



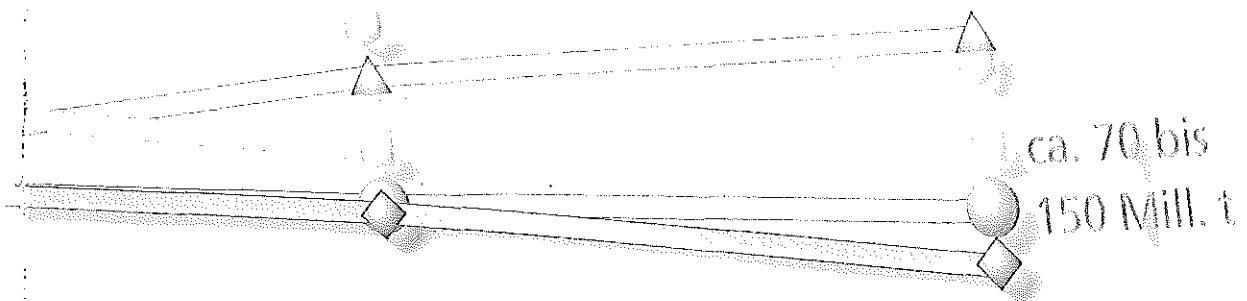
# Politikszzenarien für den Klimaschutz

Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes

herausgegeben von  
G. Stein und B. Strobel

Band 2: Emissionsminderungsmaßnahmen  
für Treibhausgase, ausgenommen  
energiebedingtes CO<sub>2</sub>

Referenzszenario  
Basisfall  
Jahres '95  
IMA-Szenario  
1996



von: M. Schön, H. Kalb, C. Nathani, R. Walz (FhG-ISI);  
F. Chr. Matthes, M. Cames, R. Fendler (Öko-Institut)

2000

2005







Forschungszentrum Jülich GmbH  
Programmgruppe Technologiefolgenforschung

# Politikszzenarien für den Klimaschutz

Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Band 2

### Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO<sub>2</sub>

herausgegeben von  
Gotthard Stein und Bernd Strobel

Federführung:

Michael Schön

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG-ISI), Karlsruhe

Bearbeiter:

Michael Schön, Heinz Kalb, Carsten Nathani, Rainer Walz

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG-ISI), Karlsruhe

Felix Christian Matthes, Martin Cames, Roland Fendler

Öko-Institut, Berlin

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Umwelt

Band 6

ISSN 1433-5530

ISBN 3-89336-216-9

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Politiksszenarien für den Klimaschutz** : Untersuchungen / Forschungszentrum Jülich. Im Auftr. des Umweltbundesamtes. Hrsg. von G. Stein und B. Strobcl. - Bd. 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO<sub>2</sub> / Bearb.: Michael Schön  
...- Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 1997  
(Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Umwelt ; Band 6)  
ISBN 3-89336-216-9

Herausgeber  
und Vertrieb:           Forschungszentrum Jülich GmbH  
                              ZENTRALBIBLIOTHEK  
                              D-52425 Jülich  
                              Telefon (024 61) 61-53 68 · Telefax (024 61) 61-61 03  
                              e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de

Umschlaggestaltung: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck:                    Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright:            Forschungszentrum Jülich 1997

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Umwelt Band 6

ISSN 1433-5530

ISBN 3-89336-216-9

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 109 05 005 gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.





## Vorbemerkungen zum Auftrag und zur Vorgehensweise

Angesichts der weltweit drohenden Klimagefahren verfolgt die Bundesregierung das Ziel, die Emissionen von Treibhausgasen und von Vorläufersubstanzen wesentlich zu reduzieren. Auf welche Weise sie dieses Ziel erreichen will, hat sie in ihrem ersten Nationalbericht nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen ausgeführt<sup>1</sup>. Darin wurden insgesamt 109 Maßnahmen - vorwiegend zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, aber auch andere Treibhausgase betreffend - genannt, von denen zum Zeitpunkt der Berichterstattung 88 Maßnahmen bereits beschlossen und umgesetzt waren, während sich 21 Maßnahmen noch in der Phase der Vorbereitung oder Diskussion befanden. Die erwartete Wirkung des Maßnahmenkatalogs wurde in Emissionsprojektionen dargestellt. Dabei stand die Betrachtung von Einzelmaßnahmen nicht im Vordergrund. Dies gilt insbesondere für die prozeßbedingten Emissionen, die bislang weit weniger im Zentrum des Interesses und der klimapolitischen Diskussion standen.

Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungszentrum Jülich (FZJ) vom Umweltbundesamt (UBA) im Rahmen des Umweltforschungsplanes mit der Durchführung eines Vorhabens „Politiksznarien für den Klimaschutz“ beauftragt. Die administrative Koordination des Gesamtvorhabens übernahm die FZJ-Programmgruppe „Technikfolgenforschung“ (TFF). Projektpartner für die fachliche Durchführung waren das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) und die FZJ-Programmgruppe „Systemforschung und Technologische Entwicklung“ (STE) sowie das Öko-Institut. Insgesamt gliedert sich das gesamte Projekt in fünf Teilvorhaben<sup>2</sup>. Der hier vorgelegte Bericht bezieht sich auf das Teilvorhaben 3, dessen Schwerpunkt auf der

---

<sup>1</sup> Klimaschutz in Deutschland. Erster Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Bonn, September 1994.

<sup>2</sup> Beim Teilvorhaben 1 (Federführung: STE) geht es um die Anwendung des IKARUS-Instrumentariums im UBA. Teilvorhaben 2 (Federführung: DIW) zielt auf die Erarbeitung von Politiksznarien mit Schwerpunkt auf der Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, während im Teilvorhaben 3 (Federführung: FhG-ISI) die Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgasemissionen, ausgenommen energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, untersucht werden. Mit dem Teilvorhaben 4 (Federführung: Öko-Institut) sollen die Voraussetzungen (rechnergestützte Hilfsmittel) für eine regelmäßige Berichterstattung über Fortschritte bei der Verminderung von Treibhausgasemissionen verbessert werden. Schließlich soll im Teilvorhaben 5 (Gemeinsame Federführung: TFF und DIW) ein Methodikleitfaden für die Wirkungsschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung entwickelt werden.

Erarbeitung von Politikszenerarien zur Minderung von Treibhausgasemissionen außer energiebedingtem CO<sub>2</sub> liegt. Der Auftrag zu diesem Teilvorhaben beinhaltet vor allem die Quantifizierung der Wirksamkeit der von Bundesregierung und Wirtschaft bisher schon ergriffenen oder vorgesehenen Maßnahmen sowie von weitergehenden Maßnahmenvorschlägen.

Innerhalb des Teilvorhabens 3 wurde dem Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG-ISI) die Federführung für die gemeinsam mit dem Öko-Institut zu erarbeitende Wirkungsanalyse von Maßnahmen und Szenarienentwicklung übertragen. Dabei war die Konzentration auf vier Treibhausgase bzw. Vorläufersubstanzen und eine treibhausgasspezifische Arbeitsteilung zwischen den beiden Instituten vereinbart worden:

FhG-ISI: Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O)

Öko-Institut: flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) und nicht-energiebedingtes CO<sub>2</sub>

Im vorliegenden Bericht wird zunächst auf die derzeitige Emissionssituation und die Abgrenzung der emissionsrelevanten Prozesse eingegangen (Abschnitt 1). Danach erfolgt die Analyse von Maßnahmen zur Emissionsminderung und weitergehenden Maßnahmenvorschlägen (Abschnitt 2), womit die Grundlage für die abschließende Szenarienerstellung (Abschnitt 3) gegeben ist. Der ausführliche Anhang enthält Detailinformationen bezüglich NMVOC und nichtenergiebedingtem CO<sub>2</sub>.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
<b>1 EMISSIONEN VON CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC UND NICHTENERGIEBEDINGTEM CO<sub>2</sub> IN DEUTSCHLAND</b>	<b>1</b>
1.1 CH <sub>4</sub>	1
1.2 N <sub>2</sub> O	1
1.3 NMVOC	3
1.4 Nichtenergiebedingtes CO <sub>2</sub>	4
<b>2 MAßNAHMEN ZUR REDUKTION DER EMISSIONEN VON CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC UND NICHTENERGIEBEDINGTEM CO<sub>2</sub> IN DEUTSCHLAND</b>	<b>7</b>
2.1 Zwischen 1990 und Mitte 1996 ergriffene Maßnahmen	7
2.1.1 Mehrere Treibhausgase betreffende Maßnahmen	7
2.1.1.1 Düngeverordnung	7
2.1.1.2 Stromeinspeisungsgesetz	9
2.1.1.3 Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien	10
2.1.1.4 ERP-Energiesparprogramm	10
2.1.2 Maßnahmen betreffend CH <sub>4</sub>	11
2.1.2.1 TA Siedlungsabfall	11
2.1.2.2 TA Abfall, Teil 1	14
2.1.2.3 Zusage des deutschen Steinkohlenbergbaus zur verstärkten Grubengasnutzung	16
2.1.3 Maßnahmen betreffend N <sub>2</sub> O	17
2.1.3.1 Freiwillige Maßnahmen zur Abgasreinigung bei der Adipinsäureproduktion	17
2.1.4 Maßnahmen betreffend NMVOC	19
2.1.4.1 Vorbemerkungen und Rahmendaten	19

## II

	Seite
2.1.4.2 Maßnahmenquantifizierung	21
2.1.4.4 Lackierung	21
2.1.4.4 Verteilung von Ottokraftstoff	23
2.1.5 Maßnahmen betreffend nichtenergiebedingtes CO <sub>2</sub>	26
2.1.5.1 Vorbemerkungen und Rahmendaten	26
2.1.5.2 Maßnahmenquantifizierung	27
Glasproduktion	27
<b>2.2 Weitere in Betracht gezogene Maßnahmen</b>	<b>29</b>
2.2.1 Maßnahmen betreffend CH <sub>4</sub>	29
2.2.1.1 Verstärkte Grubengasnutzung im Steinkohlenbergbau	29
2.2.2 Maßnahmen betreffend N <sub>2</sub> O	30
2.2.2.1 Weitergehende Verminderung des Stickstoffdüngereinsatzes in der Landwirtschaft	30
2.2.3 Maßnahmen betreffend NMVOC	33
2.2.3.1 Lackierung	33
2.2.3.2 Verteilung von Ottokraftstoffen	37
2.2.4 Maßnahmen betreffend nichtenergiebedingtes CO <sub>2</sub>	39
2.2.4.1 Zementherstellung	39
2.2.4.2 Aluminiumproduktion	40
2.2.4.3 Ammoniakherstellung	41
2.2.4.4 Glasproduktion	42
<b>3 SZENARIEN ZUR ENTWICKLUNG DER EMISSIONEN VON CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC UND NICHTENERGIEBEDINGTEM CO<sub>2</sub></b>	<b>45</b>
3.1 CH <sub>4</sub>	45
3.2 N <sub>2</sub> O	51
3.3 NMVOC	57
3.4 Nichtenergiebedingtes CO <sub>2</sub>	58
<b>4 LITERATUR</b>	<b>60</b>
4.1 Literatur zu CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O	60
4.2 Literatur zu NMVOC und nichtenergiebedingtem CO <sub>2</sub>	63

**ANHANG****67****A.1 NMVOC****67**

A.1.1	Lackierung	67
A.1.1.1	Emissionsursachen	67
A.1.1.2	Optionen	68
A.1.1.2.1	Vorbemerkung	68
A.1.1.2.2	Lösemittelarme oder lösemittelfreie Materialien	69
A.1.1.2.2.1	Wasserlacke	69
A.1.1.2.2.2	High-Solids	70
A.1.1.2.3	Pulverlacke	71
A.1.1.2.4	Sonstige Technologien	72
A.1.1.3	Verfahren zur Emissionsminderung	72
A.1.1.3.1	Adsorption	72
A.1.1.3.2	Absorption	72
A.1.1.3.3	Biologischer Abbau	73
A.1.1.3.4	Verbrennung	73
A.1.1.4	Weiterer Untersuchungsbedarf	73
A.1.2	Ottokraftstoff - Verteilung	74
A.1.2.1	Emissionsursachen	74
A.1.2.2	Optionen	75
A.1.2.2.1	Vorbemerkung	75
A.1.2.2.2	Gaspendingung	75
A.1.2.2.3	Emissionsminderungseinrichtungen	77
A.1.2.3	Weiterer Untersuchungsbedarf	78

**A.2 Nichtenergiebedingtes CO<sub>2</sub>****79**

A.2.1	Zementherstellung	79
A.2.1.1	Emissionsursachen	79
A.2.1.1.1	Portlandzement	83
A.2.1.1.2	Portlandhüttenzement	84
A.2.1.1.3	Portlandpuzzolanzemente	85
A.2.1.1.4	Hochofenzement	85
A.2.1.1.5	Vergleich der Zementarten	86
A.2.1.2	Optionen	87
A.2.1.2.1	Produktvermeidung	87
A.2.1.2.2	Ersatz des Portlandzementes durch andere Zemente	87
A.2.1.2.3	Wahl anderer Rohstoffe zur Klinkerherstellung	89
A.2.1.2.4	Einsatz des Müller-Kühne-Prozess	90
A.2.1.3	Weiterer Untersuchungsbedarf	91
A.2.1.3.1	Ersatz von Portlandzementklinker nach derzeitigem Stand der Technik	91
A.2.1.3.2	Weitergehender Ersatz von Portlandzementklinker	93
A.2.1.3.3	Einsatz von Abbruchbeton als Rohmehl	93

## IV

A.2.1.3.4	Einsatzmöglichkeiten des Müller-Kühne-Prozess	93
A.2.2	Primäraluminium	94
A.2.2.1	Emissionsursachen	94
A.2.2.2	Optionen	95
A.2.2.2.1	Produktvermeidung	95
A.2.2.2.2	Verstärkter Einsatz von Recyclingmaterial	96
A.2.2.2.3	Einsatz anderer Elektroden	98
A.2.2.2.4	Verbesserung der Kohleanoden	99
A.2.2.2.5	Andere Reduktionsverfahren	100
A.2.2.2.5.1	Reduktion des Aluminiumoxids mit Kohlenstoff	100
A.2.2.2.5.2	Elektrolyse von Aluminiumchlorid	100
A.2.2.3	Weiterer Untersuchungsbedarf	100
A.2.3	Ammoniakherstellung	101
A.2.3.1	Emissionsursachen	101
A.2.3.2	Optionen	103
A.2.3.2.1	Produktvermeidung	103
A.2.3.2.2	Alternative technische Herstellungsverfahren	104
A.2.3.2.2.1	Vorbemerkung	104
A.2.3.2.2.2	Biologische Herstellung	104
A.2.3.2.2.3	Photochemische Herstellung	104
A.2.3.2.3	Elektrochemische Herstellung	104
A.2.3.2.4	Thermochemische Herstellung	105
A.2.3.3	Weiterer Untersuchungsbedarf	105
A.2.4	Glas	106
A.2.4.1	Emissionsursachen	106
A.2.4.1.1	Vorbemerkung	106
A.2.4.1.2	Quarzglas	106
A.2.4.1.3	Silikatische Gläser	106
A.2.4.2	Optionen	107
A.2.4.2.1	Verminderung des Verbrauchs an Behälterglas	108
A.2.4.2.2	Verbesserung der Recyclings von Behälterglas	108
A.2.4.2.3	Einführung des Flachglasrecyclings	108
A.2.4.2.4	Veränderungen bei der Rezeptur der gebräuchlichsten Glassorten	109
A.2.4.3	Weiterer Untersuchungsbedarf	109

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Prognostizierte Methanbildung und -emission der Hausmülldeponien in Deutschland. ....	13
Abbildung 2:	Produktion von Farben und Lacken im Vergleich zum Nettoproduktionsindex von fünf Industriebranchen .....	22
Abbildung 3:	Produktion von Baufarben im Vergleich zum Nettoproduktionsindex des Hochbaus .....	22
Abbildung 4:	Entwicklung der CH <sub>4</sub> -Emissionen im <i>Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario</i> nach Emissionsquellen .....	45
Abbildung 5:	Entwicklung der CH <sub>4</sub> -Emissionen in den drei betrachteten Szenarien .....	46
Abbildung 6:	Entwicklung der N <sub>2</sub> O-Emissionen im <i>Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario</i> nach Emissionsquellen .....	51
Abbildung 7:	Entwicklung der N <sub>2</sub> O-Emissionen in den drei betrachteten Szenarien .....	52
Abbildung 8:	Druckfestigkeit und Abbindungsgeschwindigkeit verschiedener Zemente (schematisch) .....	88
Abbildung 9:	Klinkeranteil am Zement und Einsatz thermischer Energie bei der Zementherstellung in verschiedenen EU-Staaten .....	92
Abbildung 10:	Einsatz von Recyclingmaterial für die Herstellung von Aluminiumprodukten .....	97





**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Differenzierung der NMVOC-Emissionen in Deutschland, 1990 .....	4
Tabelle 2:	Entwicklung der nichtenergiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen nach verursachenden Produktionsprozessen, alte und neue Bundesländer .....	6
Tabelle 3:	Entwicklung der Aktivitätsparameter für ausgewählte Prozesse (1990=100 %). ....	20
Tabelle 4:	Produktionsentwicklung für ausgewählte Güter.....	27
Tabelle 5:	Emissionsfaktoren für Kohlendioxid für verschiedene Glassorten .....	28
Tabelle 6:	Ausgangswerte für die Bestimmung der Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Recyclingquote für Glas .....	28
Tabelle 7:	Emissionsgrenzwerte für Lackieranlagen gemäß österreichischer Lösemittelverordnung .....	36
Tabelle 8:	Ausgangswerte für die Bestimmung der Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Recyclingquote für Glas im <i>Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario</i> .....	44
Tabelle 9:	Entwicklung der CH <sub>4</sub> -Emissionen im <i>Ohne-Maßnahmen-Szenario</i> in kt; Werte für 1995 fiktiv .....	50
Tabelle 10:	Entwicklung der CH <sub>4</sub> -Emissionen im <i>Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario</i> in kt .....	50
Tabelle 11:	Entwicklung der CH <sub>4</sub> -Emissionen im <i>Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario</i> in kt .....	50
Tabelle 12:	Entwicklung der N <sub>2</sub> O-Emissionen im <i>Ohne-Maßnahmen-Szenario</i> in kt; Werte für 1995 fiktiv .....	56
Tabelle 13:	Entwicklung der N <sub>2</sub> O-Emissionen im <i>Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario</i> in kt .....	56
Tabelle 14:	Entwicklung der N <sub>2</sub> O-Emissionen im <i>Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario</i> in kt .....	56
Tabelle 15:	Entwicklung der prozeßbedingten NMVOC-Emissionen im <i>Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario</i> sowie im <i>Ohne-Maßnahmen-Szenario</i> (alte und neue Bundesländer) .....	57

Tabelle 16:	Instrumente zur NMVOC-Emissionsminderung und ihre Wirkungen, 2005 .....	57
Tabelle 17:	Entwicklung der prozeßbedingten NMVOC-Emissionen im <i>Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario</i> (alte und neue Bundesländer) .....	58
Tabelle 18:	Entwicklung der nichtenergiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen im <i>Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario</i> sowie im <i>Ohne-Maßnahmen-Szenario</i> (alte und neue Bundesländer) .....	58
Tabelle 19:	Entwicklung der nichtenergiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen im <i>Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario</i> (alte und neue Bundesländer) .....	59
Tabelle 20:	Instrumente zur Minderung der nichtenergiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen und ihre Wirkungen, 2005 .....	59
Tabelle 21:	Produktion von Zement und zementähnlichen Bindemitteln in Deutschland, 1993 .....	79
Tabelle 22:	Chemische Reaktionen bei der Klinkerherstellung .....	80
Tabelle 23:	Benennungen und Zusammensetzung von Zementen nach DIN 1164-1 .....	81
Tabelle 24:	Zusammensetzung von Hüttensanden für die Zementherstellung .....	82
Tabelle 25:	Zusammensetzung von natürlichen Puzzolanen, gerechnet als Oxide .....	82
Tabelle 26:	Bestandteile von Portlandzementklinker .....	83
Tabelle 27:	Zusammensetzung des Rohmaterials für Portlandzementklinker .....	83
Tabelle 28:	Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative CO <sub>2</sub> -Massen bei der Herstellung von Portlandzementklinker .....	83
Tabelle 29:	Theoretischer Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative CO <sub>2</sub> -Massen bei der Herstellung von Portlandhüttenzementen .....	84
Tabelle 30:	Theoretischer Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative CO <sub>2</sub> -Massen bei der Herstellung von Portlandpuzzolanemente .....	85

Tabelle 31:	Theoretischer Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative CO <sub>2</sub> -Massen bei der Herstellung von Hochofenzementen .....	86
Tabelle 32:	Nichtenergiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen für 1993 bei Berücksichtigung der verschiedenen Zementarten .....	86
Tabelle 33:	Bedarf an elektrischer Energie für das Mahlen von Portlandzementklinker und Hüttensand .....	89
Tabelle 34:	Material und Energieeinsatz zur Herstellung von Portlandzementklinker nach dem Müller-Kühne-Prozess .....	90
Tabelle 35:	Zusammensetzung des Rohgases aus dem Müller-Kühne- Prozess .....	90
Tabelle 36:	Zusammensetzung der Elektrolysegase bei Anoden-Effekt .....	95
Tabelle 37:	Emissionsfaktoren für CO <sub>2</sub> und CO bei der Aluminiumherstellung.....	95
Tabelle 38:	Eignung verschiedener Rohstoffe zur Wasserstoffherstellung .....	101
Tabelle 39:	Freisetzung von CO <sub>2</sub> bei der Herstellung von Wasserstoff .....	103
Tabelle 40:	Zusammensetzung von Gläsern in Gew.- % .....	107



# 1 Emissionen von CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC und nichtenergiebedingtem CO<sub>2</sub> in Deutschland

## 1.1 CH<sub>4</sub>

Die anthropogen bedingten CH<sub>4</sub>-Emissionen betrugen 1990 in Deutschland gemäß zweitem Nationalbericht knapp 5,7 Mio. t (BMU 1997). In dieser Summe sind die Emissionen aus Gewässern nicht enthalten, da sie definitionsgemäß als natürliche Emissionen betrachtet werden. Indes ist zu vermuten, daß zumindest ein Teil davon bei anaeroben Abbauprozessen von anthropogen bedingten Einträgen organischer Substanz entsteht und somit die Emissionsangabe nach oben korrigiert werden müsste. Da der anthropogen bedingte Anteil der Gewässeremissionen aber nicht zu quantifizieren ist, wurden hier die gesamten Emissionen aus Gewässern, die in Deutschland entsprechend vorliegender Grobschätzungen jährlich knapp 320 kt betragen (Hiessl in Schön/Walz et al. 1993), hinzugerechnet. Damit ergibt sich ein Ausgangswert von 6 Mio. t CH<sub>4</sub> im Jahr 1990.

Vorwiegend bedingt durch einen Rückgang der Steinkohleförderung zwischen 1990 und 1995 um 23,7 % (AG Energiebilanzen 1991 und 1996) sowie im selben Zeitraum deutlich zurückgegangene Viehbestände (Rinder -18,5 %, Schweine -23,0 %, Schafe -24,7 %; BML 1996) dürften diese Emissionen bis 1995 auf gut 5,1 Mio. t zurückgegangen sein. Ein leichter Rückgang dürfte auch bei der Abwasserreinigung in den neuen Bundesländern eingetreten sein (Ersatz der Klärschlammstabilisierung in offenen Behältern). Der emissionserhöhende Einfluß der Umstellung der Gasversorgung in den neuen Bundesländern auf Erdgas, verbunden mit einer Absatzsteigerung, wurde durch gleichzeitig erfolgte Sanierungsmaßnahmen an den Gasnetzen kompensiert, so daß entgegen ursprünglicher Vermutungen (vgl. Reichert in Schön et al. 1995) wohl bereits 1994 eher niedrigere Emissionen aus dem Bereich Gasgewinnung und insbesondere -transport zu verzeichnen waren.

Bei einem relativen Treibhauspotential von CH<sub>4</sub> von 21 (Zeithorizont 100 Jahre; Houghton et al. 1996) entspricht dies einem Rückgang des CO<sub>2</sub>-Äquivalentes von knapp 130 Mio. t im Jahr 1990 auf rund 110 Mio. t im Jahr 1995.

## 1.2 N<sub>2</sub>O

Die anthropogen bedingten N<sub>2</sub>O-Emissionen betrugen 1990 in Deutschland gut 230 kt.

Gemäß einer Rechenvorschrift des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 1996, Watson et al. 1996) kann davon ausgegangen werden, daß von den

Stickstoffmengen, die auf landwirtschaftliche Böden ausgebracht werden und die nicht unmittelbar danach auf dem Luftpfad (als  $\text{NO}_x$  bzw.  $\text{NH}_3$ ) wieder entweichen,  $1,25 \pm 1 \%$  als  $\text{N}_2\text{O}$  emittiert werden. Durch indirekte (Wieder-)Einträge von Stickstoff auf dem Luftpfad werden weitere Emissionen aus Böden verursacht. Weitere  $0,75 \%$  werden nach der Berechnungsvorschrift auf indirektem Wege aus Gewässern emittiert. Ursache dieser indirekten Emissionen aus Gewässern sind z. B. Stickstoffaus- und abwaschungen sowie wiederum indirekte Einträge über den Luftpfad. Desweiteren sind direkt im Stall auftretende  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen aus tierischen Abfällen zu berücksichtigen.

1990 wurden in Deutschland rund 3.130 kt Stickstoffdünger ausgebracht. Bei Anwendung der ausführlichen Rechenvorschrift und Berechnung mit dem angegebenen Mittelwert ergeben sich somit landwirtschaftlich bedingte Emissionen im Jahr 1990 von 102 kt  $\text{N}_2\text{O}$ . Darin enthalten sind die im Nationalbericht nicht ausgewiesenen Emissionen in Höhe von knapp 7 kt, die durch Stickstoffeinträge auf dem Luftpfad verursacht werden sowie 11 kt  $\text{N}_2\text{O}$  als Stallemissionen.

Damit ergibt sich ein Ausgangswert von insgesamt gut 230 kt  $\text{N}_2\text{O}$  im Jahr 1990. Bei einem relativen Treibhauspotential des  $\text{N}_2\text{O}$  von 310 (Zeithorizont 100 Jahre; Houghton et al. 1996) entspricht dies einem  $\text{CO}_2$ -Äquivalent von gut 70 Mio. t.

Es ist von einem mittlerweile eingetretenen Rückgang der Emissionen im Bereich der Landwirtschaft auszugehen. Hauptgrund ist der deutlich verringerte Einsatz von Stickstoffdünger, teilweise als Folge eines Rückganges der landwirtschaftlichen Nutzfläche und eines deutlichen Rückganges des Viehbestandes und der damit anfallenden Wirtschaftsdüngermengen. Auch die Stallemissionen sind damit geringfügig zurückgegangen. Möglicherweise hat auch die Düngeverordnung schon vor ihrem Inkrafttreten im Jahre 1996 eine gewisse Wirkung auf die eingesetzten Stickstoffdüngermengen gezeigt.

Ferner sind die Emissionen aus Feuerungsanlagen wegen leicht rückläufigen Kohleeinsatzes ebenfalls etwas geringer als 1990. Diese Effekte sind allerdings nur mit groben Unschärfen zu quantifizieren.

Eine wesentliche Emissionsquelle ist die Produktion von Adipinsäure. Hier wurde die Inbetriebnahme einer wirksamen Anlage zur Abscheidung von  $\text{N}_2\text{O}$  aus den Produktionsabgasen eines der beiden deutschen Hersteller durch die Produktionssteigerung des anderen Herstellers in etwa kompensiert.

1995 dürften die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen somit unter 230 kt gelegen haben. Allerdings plant der zweite Adipinsäurehersteller ebenfalls entsprechende technische Lösungen, so daß bereits mittelfristig von einem deutlichen Emissionsrückgang auszugehen ist.

## 1.3 NMVOC

Die Analyse derjenigen NMVOC-Emissionen, die nicht dem Verkehr oder der Energieumwandlung zuzuordnen sind, erfolgt auf der Grundlage einer differenzierten Betrachtung der wichtigsten Verursacherprozesse.<sup>1</sup>

Die folgende Tabelle zeigt die hier betrachteten Prozesse und die ihnen jeweils zugeordneten NMVOC-Emissionen. Neben den unterschiedlichen Produktionsprozessen sind dies Lösemittelverwendungen und die Verteilung von Ottokraftstoff.

Aus der Übersicht wird deutlich, daß der überwiegende Teil der hier zu betrachtenden NMVOC-Emissionen im Jahre 1990 dem westlichen Teil Deutschlands zuzurechnen ist, der Anteil der vormaligen DDR betrug nur etwa 15%.

Den wichtigsten Anteil stellen dabei sowohl im Osten als auch im Westen die Lösemittelverwendungen dar. Zwar liegt der Verursacheranteil dieser Prozesse in West-Deutschland mit 75% deutlich über dem in der vormaligen DDR (56%), in beiden Teilen Deutschlands ist dies jedoch der dominierende Bereich. Mit Anteilen von 33 % (West) bzw. 43 % (Ost) markieren dabei Lackierungsprozesse die größte Teilmenge der Emissionen bei den Lösemittelverwendungen.

Der zweitwichtigste Bereich ist jeweils die Verteilung von Ottokraftstoffen - die dabei entstehenden Verdunstungs-Emissionen tragen in der alten Bundesrepublik mit 13 % und in Ostdeutschland mit 21 % zur Gesamtemission bei.

Die Liste der Prozesse macht aber auch deutlich, daß in bezug auf die NMVOC-Emissionen eine ganze Reihe von sehr diffusen Bereichen zu berücksichtigen sind. Generell bleibt so für diesen Bereich eine erhebliche Datenunsicherheit zu konstatieren.

Die folgenden Analysen wurden auf die beiden wichtigsten Verursacherprozesse, die Kraftstoffverteilung und die Lackierungsprozesse beschränkt, da damit ein wesentlicher Teil der Emissionen abgedeckt wird.

---

<sup>1</sup> Einige Erläuterungen zu den wichtigsten Zusammenhängen sind im Anhang zusammengestellt.

Tabelle 1: Differenzierung der NMVOC-Emissionen in Deutschland, 1990

	West	Ost	Gesamt
	kt		
Ottokraftstoff-Verteilung	171,7	48,0	219,7
Industrieprozesse	111,1	45,2	156,3
<i>Raffinerieeinsatz</i>	25,4	32,1	57,5
<i>Walzstahl</i>	1,2	0,2	1,4
<i>Eisen-, Stahl- und Temperguß</i>	1,3	0,2	1,5
<i>Steinkohle-Verkokung</i>	5,5	0,5	6,0
<i>Bitumen-Mischgut</i>	2,9	0,6	3,5
<i>Organische Produkte</i>	52,3	7,4	59,7
<i>Brotherstellung</i>	12,3	2,6	14,9
<i>Bierherstellung</i>	2,0	0,3	2,3
<i>Weinherstellung</i>	0,4	0,0	0,4
<i>Zuckerherstellung</i>	3,3	0,8	4,1
<i>Spanplattenproduktion</i>	4,5	0,5	5,0
Lösemittelverwendung	1.030,0	130,0	1.160,0
<i>Lackierung</i>	440,0	100,0	540,0
<i>Entfettung, Chemische Reinigung</i>	110,0	4,0	114,0
<i>Herstellung und Anwendung chemischer Produkte</i>	70,0	0,0	70,0
<i>Übrige Lösemittelverwendung</i>	410,0	26,0	436,0
FCKW	33,0	9,0	42,0
Halone	0,7	0,0	0,7
Summe	1.346,5	232,2	1.578,7

## 1.4 Nichtenergiebedingtes CO<sub>2</sub>

Nichtenergiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen im Unterschied zu den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht durch die Verbrennung von Energieträgern, sondern bei der Herstellung von Produkten durch andere chemische Prozesse.

Die folgenden technologischen Prozesse wurden hinsichtlich der nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen als besonders wichtig identifiziert<sup>2</sup>:

- Zementklinkerherstellung
- Kalkbrennen
- Herstellung von Hüttenaluminium
- Herstellung von Glas
- Herstellung von Kalziumkarbid

<sup>2</sup> Einige Erläuterungen zu den wichtigsten Zusammenhängen sind im Anhang zusammengestellt. Zur Abgrenzung der energiebedingten von den nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen vgl. den Abschlußbericht zum Teilvorhaben 2, Abschnitt 4.3.



- Herstellung von Ammoniak
- Herstellung von Soda.

Als Grundlage für die Emissionsberechnung muß dementsprechend der Produktionsausstoß für diese Produkte herangezogen werden. Diesbezüglich liegen - insbesondere für die Daten im Ostteil Deutschlands - teilweise voneinander abweichende Angaben vor. Für einige Prozesse weichen die für das IKARUS-Projekt genutzten Daten von den im UBA genutzten Produktionszahlen ab. Die Unterschiede in beiden Datenbasen führen jedoch bei der Ermittlung der entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht zu signifikanten Abweichungen. Für die Berechnung der Emissionen im Basisjahr 1990 wurden daher die Produktstatistiken des Umweltbundesamtes zugrunde gelegt.

Im Jahre 1989 verursachte die Herstellung dieser Produkte auf dem Gebiet der heutigen Bundesrepublik Deutschland Emissionen von 31,3 Mio. t CO<sub>2</sub>. Davon entfielen 69 % auf die alten und 31 % auf die neuen Bundesländer. 1990 verringerten sich diese Emissionen um rund 12 % auf ca. 27,5 Mio. t CO<sub>2</sub>. Diese Verminderung ist ausschließlich dem wirtschaftlichen Strukturwandel in den neuen Bundesländern zuzurechnen (Verminderung um 43 %), in den alten Bundesländern stiegen die Emissionen leicht an (2 %).

Hinsichtlich des Gewichtes der unterschiedlichen Prozesse ergibt sich das folgende Bild:

- Über die Hälfte der (gesamtdutschen) Emissionen (rund 59 %) wird durch die Herstellung von Zementklinker verursacht.
- Die Kalkproduktion (Kalkbrennen) verursacht ca. ein Viertel (22 bzw. 23 % in den Jahren 1989/90) der nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- Bei der Ammoniak-Synthese werden 7 bzw. 6 % der nichtenergiebedingten Kohlendioxid-Emissionen emittiert.
- Die anderen vier Prozesse haben Verursacheranteile von jeweils 1 bis 4 %.

Die folgende Tabelle zeigt die nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Prozessen für die Jahre 1989 und 1990 im Überblick.

Diese Struktur für Gesamt-Deutschland verändert sich auch bei getrennter Betrachtung des Ost- und des West-Teils nicht grundsätzlich. Einzig bei der Herstellung (Anteil West 4 % - Ost 0 %), Kalziumkarbid (Anteil West 0 % - Ost 5 %) sowie von Ammoniak (Anteil West 5 % - Ost 11 %) ergeben sich größere Abweichungen.

Tabelle 2: Entwicklung der nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nach verursachenden Produktionsprozessen, alte und neue Bundesländer

	1989	1990
	Mio. t CO <sub>2</sub>	
Zementklinker	17.728	16.146
Kalk	8.019	6.417
Hüttenaluminium	0.973	0.904
Glas	1.104	1.213
Kalziumkarbid	0.593	0.353
Ammoniak	2.026	1.747
Soda	0.897	0.736
Summe	31.340	27.516
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts		

## 2 Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen von CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC und nichtenergiebedingtem CO<sub>2</sub> in Deutschland

### 2.1 Zwischen 1990 und Mitte 1996 ergriffene Maßnahmen

#### 2.1.1 Mehrere Treibhausgase betreffende Maßnahmen

Eine Reihe von Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft erscheint geeignet, sowohl die Emissionen von CH<sub>4</sub> als auch von N<sub>2</sub>O zu senken, wenngleich sie in erster Linie als Maßnahmen zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. der Boden- und Gewässerbelastung durch landwirtschaftliche Aktivitäten konzipiert wurden.

Es sind im wesentlichen Maßnahmen des bisherigen IMA-Katalogs, die zwischen 1990 und Mitte 1996 ergriffen wurden. Hier zu nennen sind die Maßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien, sofern sie die Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Abfällen, insbesondere aus Gülle, betreffen und somit auch einen Beitrag zur Verminderung der bei der Lagerung dieser Abfälle entstehenden CH<sub>4</sub>-Emissionen leisten. Positive Auswirkungen sind aber auch für die Einführung von Güllebehandlungsverfahren denkbar, die über eine integrierte Biogaserzeugung verfügen. Diese Verfahren sollen die Gülle in lager- und transportierfähige Düngeprodukte überführen und eine zeitlich und mengenmäßig angepasste Stickstoffzufuhr auf Böden erleichtern. Damit wirken sie letztlich auch N<sub>2</sub>O-mindernd.

Desweiteren ist die 1996 in Kraft getretene Düngeverordnung zu nennen, die primär die N<sub>2</sub>O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden senken dürfte, und deren Umsetzung durch Einführung der genannten Güllebehandlungsverfahren erleichtert würde.

Nachfolgend werden vier Treibhausgas-übergreifende Maßnahmen dargestellt, und zwar als **ordnungsrechtliche Maßnahmen**

- die Düngeverordnung und
  - das Stromeinspeisungsgesetz
- sowie als **finanzielle Anreize** gewährende Programme
- das Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und
  - das ERP-Energiesparprogramm.

##### 2.1.1.1 Düngeverordnung

Die Vorlage einer Düngeverordnung wurde als Nr. 64 des bisherigen IMA-Kataloges geführt. Die mittlerweile - im Januar 1996 - erlassene und im Juli 1996 vollständig in Kraft getretene Verordnung (Düngeverordnung 1996) besagt, daß Dün-

gemittelt zeitlich und mengenmäßig so auszubringen sind, daß die Nährstoffe von den Pflanzen weitestgehend ausgenutzt werden können und damit Nährstoffverluste bei der Bewirtschaftung sowie damit verbundene Einträge in die Gewässer weitestgehend vermieden werden. Darüber hinaus beinhaltet sie Begrenzungen der mit Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft aufgebrauchten Stickstoffmenge. Die Verordnung dient auch der Umsetzung der EU-Richtlinie zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (EU-Nitratrichtlinie 1991). Die bisherigen Regelungen, z. B. Gülleverordnungen einzelner Bundesländer, verhinderten bislang eine überhöhte Nährstoffzufuhr der Böden de facto nicht.

Eine technische Lösung könnten aufwendigere Verfahren der Güllebehandlung darstellen, die stabilisierte, transport-, lager- und damit handelsfähige Düngerprodukte aus der Gülle separieren und so die von der Verordnung geforderte, zeitlich und flächenmäßig angepasste, bedarfsgerechte Nährstoffzufuhr erleichtern. Damit ergeben sich direkte Auswirkung auf die Stickstoffbilanz und die Emissionen von  $N_2O$ . In der Regel verfügen diese Anlagen über eine integrierte Biogasanlage, womit auch ein Beitrag zur  $CH_4$ -Emissionsminderung geleistet wird.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Verfahren zusammen mit einer ausführlichen Diskussion der hemmenden und fördernden Einflüsse auf ihre Einführung in Deutschland wurde unlängst im Auftrag des Umweltbundesamtes gegeben. Dabei wurden auch die ökonomischen und rechtlichen Aspekte einschließlich des Einflusses der Düngeverordnung beleuchtet (Schön, 1997 in Angerer et al. (1997)).

Ob die gerade erst erlassene Düngeverordnung die Voraussetzungen für die breite Einführung von Güllebehandlungsverfahren oder auch zur verstärkten Nutzung der Biogastechnologie als integriertem Bestandteil von diesen schaffen kann, läßt sich aus heutiger Sicht noch nicht beurteilen. Voraussetzung wären auf jeden Fall gesetzliche Rahmenbedingungen, die die Verwendung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft wirksam regeln.

Eine Quantifizierung der Wirkung der Düngeverordnung ist somit kaum möglich. Indes kann davon ausgegangen werden, daß die Verordnung einen gewissen Beitrag zur Senkung der Stickstoffzufuhr auf landwirtschaftliche Böden leisten wird. Inwieweit der in der jüngsten Vergangenheit beobachtete Trend zu verringertem Stickstoffeintrag schon eine vorweggenommene Wirkung der Düngeverordnung darstellt, läßt sich schwer beurteilen. Im Falle einer forcierten Umsetzung der Verordnung bzw. durch Einsatz geeigneter Instrumente erschienen weitergehende Beschränkungen des Stickstoffeinsatzes denkbar (vgl. hierzu die Ausführungen bzgl. weiterer in Betracht zu ziehender Maßnahmen).

### 2.1.1.2 Stromeinspeisungsgesetz

Das als Nr. 3 des bisherigen IMA-Kataloges geführte Stromeinspeisungsgesetz (1990) soll die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen fördern (vgl. auch die Ausführungen im Rahmen des Berichtes zu Teilvorhaben 2). Nach dem Gesetz ist von den Energieversorgungsunternehmen eine Einspeisevergütung auch für eigen erzeugten Strom aus biologischen Rest- und Abfallstoffen der Land- und Forstwirtschaft zu gewähren. Betroffen sind also z. B. landwirtschaftliche Biogasanlagen, auch als Bestandteil integrierter Güllebehandlungsverfahren.

Mit Inkrafttreten im Jahr 1991 wurde zunächst eine Vergütung von mindestens 75 % des Durchschnittserlöses je Kilowattstunde aus der Stromabgabe von Elektrizitätsversorgungsunternehmen an alle Letztverbraucher gewährleistet, mit der Änderung im Jahr 1994 erhöhte sich dieser Vergütungssatz auf 80 %.

Die Wirtschaftlichkeitsaspekte der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung wurden in einer kürzlich abgeschlossenen Untersuchung für das Umweltbundesamt ausführlich untersucht (Schön et al. 1995). Unter den bis zum Erlass des Gesetzes herrschenden Rahmenbedingungen war die Biogaserzeugung in landwirtschaftlichen Anlagen wenig rentabel gewesen und kam dementsprechend nur vereinzelt zur Anwendung. Durch das Stromeinspeisungsgesetz ergab sich eine gewisse Verbesserung dieser Situation. Gleichwohl ist aber nach wie vor nur in sehr günstigen Fällen Rentabilität ohne weitere Subventionierung der Investitionskosten zu erreichen.

So wurden in jüngerer Vergangenheit eine Reihe von Kofermentationsanlagen errichtet, in denen Flüssigmist und andere organische Reststoffe vergärt werden. Durch die zusätzlichen Erlöse, z. B. für die Entsorgung von kommunalem Mähgut oder von Schlachthofabfällen, kann im günstigsten Falle auch eine Rentabilität ohne weitere Subvention erreicht werden.

Gegen das Stromeinspeisungsgesetz werden generelle verfassungsrechtliche Bedenken seitens der Elektrizitätsversorgungsunternehmen vorgebracht. Neuerdings traten im an sich günstigen Fall von Kofermentation vermehrt Fälle auf, in denen Energieunternehmen Strom aus Biogasanlagen, in denen auch nicht-landwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe eingesetzt werden, nicht nach dem Stromeinspeisungsgesetz vergüten. Als Begründung wird § 1 des Gesetzes genannt, in dem durch das Wort "ausschließlich" biologische Rest- und Abfallstoffe von anderer als landwirtschaftlicher (bzw. forstwirtschaftlicher) Herkunft ausgegrenzt werden.

Die Wirkung des Gesetzes auf eine breite Einführung der Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Abfällen läßt sich kaum quantifizieren. Hinweise auf eine fördernde Wirkung sind aus der beobachteten Zunahme der Zahl landwirtschaftlicher Biogasanlagen um rund 100 seit Inkrafttreten ableitbar. Der Zuwachs wurde aber

durch das Zusammenwirken einer Reihe von Einflüssen bewirkt, so daß die Wirkung des Stromeinspeisungsgesetzes nicht zu separieren ist.

Bezüglich der genannten Umsetzungshemmnisse (verfassungsrechtliche Bedenken, formale Ausgrenzung der Kofermentation) wird bei der Szenariobildung davon ausgegangen, daß die Vergütungsregelungen ggf. in modifizierter, aber gleichwertiger Form auch künftig erhalten bleiben. Als notwendige Voraussetzung für eine hohe Wirksamkeit ist die Klärung des Status von Strom aus Kofermentationsanlagen anzusehen.

#### **2.1.1.3 Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien**

Der Geltungsbereich des als Nr. 6 des bisherigen IMA-Kataloges geführten Programms (vgl. auch die Ausführungen im Rahmen des Berichtes zu Teilvorhaben 2) wurde Mitte 1995 auf Biomasse erweitert (Nr. 112 des erweiterten Kataloges). Das Programm beinhaltet die Förderung von Errichtung und Erweiterung von Biogasanlagen zur Verwendung überwiegend landwirtschaftlicher Abfälle ab 50 m<sup>3</sup> Faulraumvolumen mit 200 DM pro m<sup>3</sup> Faulraum bis maximal 200 TDM je Anlage.

Bei der Abschätzung der Wirkung auf die breitere Einführung landwirtschaftlicher Biogasanlagen, auch als Bestandteil integrierter Güllebehandlungsverfahren, gilt generell, wie auch im Falle des Stromeinspeisungsgesetzes, daß das Zusammenwirken einer Reihe von Einflüssen zu berücksichtigen und somit die Wirkung des Förderprogrammes nicht zu separieren ist. Nach einem ersten Ergebnis einer derzeit laufenden Evaluierung des Programmes durch das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Frahm et al., 1997) läßt sich aber ein eher geringer Beitrag vermuten. Eine Extrapolation auf Basis der bis Juni 1996 vorgelegten Förderanträge läßt nämlich nur eine geringe Anreizwirkung und eine Fördersumme für Biogasanlagen von deutlich unter 10 Mio. DM während der Laufzeit des Förderprogrammes bis Mitte 1998 erwarten.

#### **2.1.1.4 ERP-Energiesparprogramm**

Die Maßnahme Nr. 7 des bisherigen IMA-Kataloges, das ERP-Energiesparprogramm, beinhaltet die Bereitstellung zinsgünstiger Kredite u. a. für Vorhaben zur Nutzung erneuerbarer Energien, somit auch für landwirtschaftliche Biogasanlagen. ERP-Darlehen können in Höhe von 50 % der Investitionskosten in Anspruch genommen werden. Außerdem werden Biogasanlagen auch von der Deutschen Ausgleichsbank im Rahmen ihres Umweltprogramms mit bis zu 25 % der Investitionskosten gefördert (vgl. Deutsche Ausgleichsbank 1996).

Gemäß der im Rahmen dieses UFOPLAN-Vorhabens durchgeführten vertieften Betrachtung des Programmes durch das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (vgl. die Ausführungen im Rahmen des Berichtes zu Teilvorhaben 2) müssen als Voraussetzung für die Wirksamkeit derartiger Instrumente die Finanzierungsbedingungen der Sonderkredite deutlich besser sein als die üblichen Marktkredite. Die Differenz zum Marktzins ist derzeit aber vermutlich zu gering (maximal 1 %-Punkt).

Generell gilt, wie auch bei den meisten hier diskutierten Maßnahmen, daß das Zusammenwirken einer Reihe von Einflüssen zu berücksichtigen ist, so daß die Wirkung des Programmes auf den Ausbau der landwirtschaftlichen Biogasnutzung nicht separat zu quantifizieren ist. Außerdem ist speziell in diesem Falle die Zuordnung des Kreditvolumens zu Maßnahmen der rationellen Energieverwendung und zum Ausbau der erneuerbaren Energien nicht möglich.

## 2.1.2 Maßnahmen betreffend CH<sub>4</sub>

Nachfolgend werden drei Maßnahmen dargestellt, die neben anderen Umweltaspekten v. a. auch auf eine CH<sub>4</sub>-Emissionsminderung abzielen. Es sind dies die **ordnungsrechtlichen Maßnahmen**

- TA Siedlungsabfall und
- TA Abfall, Teil 1,

sowie als **freiwillig ergriffene Maßnahme der Wirtschaft**

- die Zusage des deutschen Steinkohlenbergbaus zur verstärkten Grubengasnutzung.

### 2.1.2.1 TA Siedlungsabfall

Die TA Siedlungsabfall (1993) wurde als Nr. 66 des bisherigen IMA-Kataloges geführt. Die darin enthaltenen Bestimmungen sind geeignet, die CH<sub>4</sub>-Emissionen aus dem Abfallbereich drastisch zu reduzieren. Zwei Aspekte sind in diesem Zusammenhang hervorzuheben:

- Zum einen werden Anforderungen spezifiziert, die im Planfeststellungs- oder Genehmigungsverfahren für neue oder wesentlich zu ändernde Deponien einzuhalten sind. Hierzu werden in Anhang B der TA Siedlungsabfall gemäß den Zuordnungskriterien für zwei Deponieklassen Maximalwerte für den organischen Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz vorgegeben. Sie werden als Glühverlust (max. 3 Masse- % für Deponieklasse I bzw. 5 % für Deponieklasse II) oder als TOC (max. 1 % bzw. 3 %) bestimmt. Durch die Einhaltung der Zuordnungswerte soll insbesondere erreicht werden, daß sich praktisch kein (methanhaltiges) Deponiegas entwickelt, die organische Sickerwasserbelastung sehr gering ist und nur geringfügige Setzungen als Folge eines biologischen Ab-

baus von organischen Anteilen in den abgelagerten Abfällen auftreten. Unter Berücksichtigung von Ausnahmeregelungen sind diese Kriterien spätestens ab 1. Juni 2005 einzuhalten. Es ist nach gegenwärtigem Stand der Technik davon auszugehen, daß die Umsetzung der TA Siedlungsabfall die Anwendung thermischer Verfahren notwendig machen wird.

- Zum anderen gilt für Altanlagen, also für stillgelegte Deponieabschnitte, aber auch für noch in Betrieb befindliche Deponien und solche, die erst genehmigt bzw. deren Vorhaben im Planfeststellungsverfahren öffentlich bekannt gemacht worden sind, daß das Deponiegas dem Stand der Technik entsprechend zu erfassen und - vorrangig mit Energienutzung - zu verbrennen ist. Hierfür gelten in Anhang C aufgeführte Anforderungen. Für die Planung und Ausführung dieser Maßnahmen sind Übergangsfristen vorgesehen. Maximalfristen sind 2 Jahre für die Erstellung der Pläne, 2 weitere Jahre für Prüfung und Genehmigung und 6 Jahre für die Umsetzung der Maßnahmen. Damit wäre spätestens im Jahre 2003 mit der Einhaltung der Anforderungen für Altanlagen zu rechnen.

Da nach Ablauf der Übergangsfrist ab 2005 Methan nur noch aus den bis dahin abgelagerten Hausmüllmengen freigesetzt wird und bereits vorher die entstehenden Methanmengen weitgehend zu erfassen sind, ist für eine Abschätzung der danach anfallenden Methanemissionen eine Prognose der künftigen Hausmüllmengen nicht erforderlich. Lediglich für den Zeitraum von heute bis spätestens 2003/2005 wäre eine entsprechende quantitative Annahme erforderlich. Da aber trotz des Abklingens der Methanbildung in Hausmülldeponien mit einer durchschnittlichen Halbwertszeit von rund 8 1/2 Jahren ein Großteil der Methanemissionen aus den bis dato abgelagerten Müllmengen stammt, ist der Einfluß einer Variation der in den nächsten 7 bis 9 Jahren anfallenden Mengen gering und kann angesichts der insgesamt vorhandenen Schätz-Unsicherheiten vernachlässigt werden.

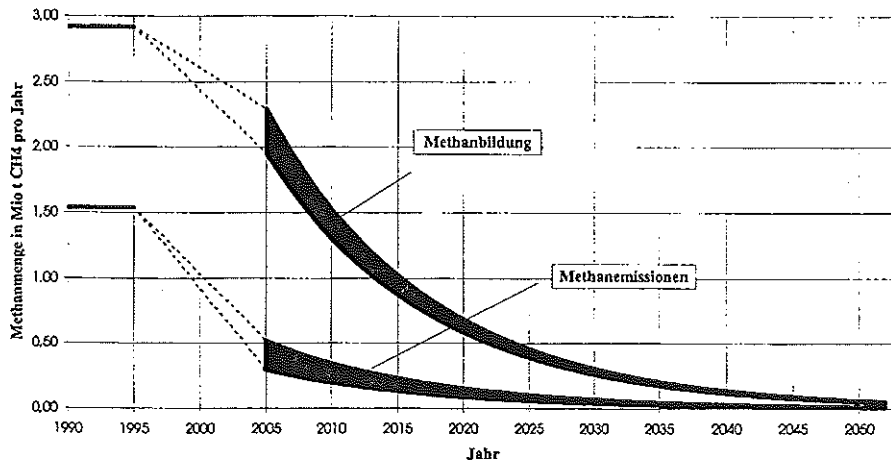
Gemäß einer aktuellen Schätzung von Angerer und Kalb (in Schön et al. 1995) werden sich als Folge der Umsetzung der TA Siedlungsabfall die Deponiegasfreisetzungen mittelfristig drastisch verringern. Die nachfolgende Abbildung zeigt den erwarteten zeitlichen Verlauf der *Bildung* von Methan als Bestandteil des Deponiegases, wie er sich ergibt, wenn nach der Übergangsfrist spätestens ab 2005 keine unbehandelten Abfälle mehr abgelagert werden dürfen, und den resultierenden Verlauf der *Methanemissionen*, bei dem neben der Oxidation von  $\text{CH}_4$  im Deponiekörper die ab 2003 einzuhaltenden Anforderungen an die Deponiegaserfassung berücksichtigt sind. Der unsichere zeitliche Verlauf des Ausbaus thermischer Behandlungskapazitäten wird durch die gestrichelte Darstellung für den Zeitraum bis 2005 dokumentiert.

Nach dieser Abschätzung werden sich die Methanemissionen aus dem Bereich der Abfalldeponien von heute knapp 1,8 Mio. t/a bis zum Jahr 2005 bereits auf unter



500 kt/a verringert haben. Danach ist mit einem weiteren deutlichen Abklingen der Emissionen auf rund 140 kt/a im Jahr 2020 zu rechnen.

Abbildung 1: Prognostizierte Methanbildung und -emission der Hausmülldeponien in Deutschland. Quelle: Angerer/Kalb in Schön et al. 1995



Als Effekt einer beschlossenen Maßnahme ist die hier abgeschätzte CH<sub>4</sub>-Emissionsentwicklung als Referenzfall anzusehen. Die CH<sub>4</sub>-Emissionen aus Hausmülldeponien lassen sich über das von der TA Siedlungsabfall geforderte Maß hinaus praktisch nicht weiter verringern, da die CH<sub>4</sub>-Bildung aus inertisierten Abfällen so gut wie vollständig ausgeschlossen ist und die Anforderungen an die Gas erfassung das im praktischen Betrieb technisch Machbare widerspiegeln. Auch Verkürzungen der vorgeschriebenen Fristen erscheinen unrealistisch. Insofern ist in einem *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* keine zusätzliche Emissionsminderung in diesem Bereich möglich.

Notwendige Voraussetzung dafür, daß diese Emissionsentwicklung tatsächlich in vollem Umfang und innerhalb des dargestellten Zeitrahmens eintritt, ist, daß bei eventuellen Modifikationen der nach wie vor umstrittenen TA Siedlungsabfall (z. B. im Sinne einer "Öffnung" für alternative, nicht-thermische Verfahren) keine nennenswerten Abstriche hinsichtlich der Inertisierungsanforderungen und keine Fristverschiebungen zugelassen werden.

In der Regel wird die bei der thermischen Abfallbehandlung anfallende Abwärme zur Strom- und/oder Fernwärmeerzeugung genutzt, womit sich fossile Energieträger substituieren lassen. Eine Abschätzung der hierfür anzurechnenden CO<sub>2</sub>-Emissionsgutschrift ist allerdings schwierig. Hierfür sind mehrere Gründe zu nennen: Zum einen erlauben gegenläufige Einflüsse auf den Heizwert von Siedlungsabfällen

(getrennte Erfassung von Papier und Kunststoffen: Heizwertsenkung; Abtrennung kompostierbarer Komponenten: Heizwertsteigerung) keine zuverlässige Abschätzung der Heizwertentwicklung. Als weiteres Erschweris der energetischen Bewertung von Hausmüll kommt neben den Wirkungsgradunterschieden verschiedener Verfahren der Wärme und Stromauskopplung (z. B. KWK mit Gegendruckturbinen oder Entnahme-Kondensationsturbinen) die schwer abschätzbare Rolle neuartiger thermischer Verfahren, also der verschiedenen Kombinationen von Pyrolyse (bzw. Entgasung), Vergasung und Verbrennung hinzu, deren Energieauskopplung stark variiert. Zu nennen wären beispielsweise neben vielen anderen, die hier nicht vollständig aufgezählt werden können, das *Schwel-Brenn-Verfahren* von Siemens, das *Noell-Konversionsverfahren* oder das *Thermoselect-Verfahren*. Zum anderen ist der absolute CO<sub>2</sub>-Effekt im Gegensatz zur Abschätzung der CH<sub>4</sub>-Emissionen von der schwer zu prognostizierenden Siedlungsabfallmenge abhängig. Der in der jüngeren Vergangenheit bundesweit eingetretene Rückgang der Hausmüllmengen führt dazu, daß derzeit die Kapazitätsplanungen verschiedener entsorgungspflichtiger Gebietskörperschaften nach unten korrigiert werden müssen. So hat beispielsweise - um nur einige Beispiele aus Baden-Württemberg zu nennen - der Landkreis Esslingen die Pläne zur Errichtung einer *Thermoselect*-Anlage aufgegeben (BNN 30.09.95). Pläne für das Böblinger Müllheizkraftwerk wurden von ursprünglich 316.000 t/a auf eine Kapazität von 140.000 t/a "abgespeckt" (Energie Spektrum 9/95). Als weitere Beispiele sind Überlegungen zur künftigen Kapazitätsauslastung des Müllheizkraftwerkes Mannheim oder zur möglichen Verringerung von drei auf zwei Linien der in Karlsruhe geplanten *Thermoselect*-Anlage anzuführen, die in jüngerer Vergangenheit angesichts rückläufiger Hausmüllmengen im Zweckverband Abfallwirtschaft Rhein-Neckar bzw. im Stadt- und Landkreis Karlsruhe angestellt wurden.

#### 2.1.2.2 TA Abfall, Teil 1

Die TA-Abfall, Teil 1 (1991) fordert für abzulagernde Sonderabfälle bestimmte Zuordnungskriterien. So darf der Abfall z. B. nur wenig organische Substanz enthalten (Glühverlust < 10 %; zum Vergleich: die TA-Siedlungsabfall fordert für Hausmüll und hausmüllähnliche Abfälle einen Glühverlust von < 5 % für Deponieklasse II). Diese Forderung läßt sich bei Abfällen mit größeren Anteilen an organischen Stoffen nur durch eine Vorbehandlung, in der Regel eine thermische Behandlung (z. B. Verbrennung) erreichen. Der so behandelte Abfall ist inert und biologisch nicht weiter abbaubar. Nach Vollzug der TA-Abfall wird somit mit Sonderabfällen keine biologisch abbaubare organische Substanz mehr abgelagert und es findet keine CH<sub>4</sub>-Bildung in neuen Ablagerungen statt.

Die TA-Abfall ist im April 1991 in Kraft getreten. Für den Fall, daß nicht genügend Behandlungskapazitäten für die Abfälle zur Verfügung stehen, enthält sie Übergangsfristen. Die Abfälle dürfen dann auf Altdeponien noch bis April 1997 abgelagert werden, auf Monodeponien (also auf nur für eine Abfallsorte vorgesehene De-

ponieabschnitte) bis April 1999. Danach ist die TA-Abfall ohne Ausnahmen in Kraft.

Zur Abschätzung der CH<sub>4</sub>-emissionsmindernden Wirkung der TA Abfall, Teil 1 ist es erforderlich, zunächst die jährlich anfallenden Mengen biologisch abbaubarer Sonderabfälle zu kennen. Bei diesen Sonderabfällen dürfte es sich im Basisjahr 1990 insgesamt nur um kleine Mengen gehandelt haben. Wie aus der Abfallstatistik zu entnehmen ist, sind darunter folgende Abfallarten die bedeutendsten (Statistisches Bundesamt 1990a, b): verunreinigte Holzabfälle, verunreinigtes Verpackungsmaterial aus Pappe/Papier und evtl. Klärschlämme.

Unter den *Holzabfällen* machen "Holzabfälle, und -behältnisse" mit anorganischen Verunreinigungen mit ca. 70.000 t (auf öffentlichen Deponien) den größten Beitrag aus. Hinzu kommen evtl. noch gewisse Mengen auf betrieblichen Deponien, die statistisch nur gemeinsam mit der außerbetrieblichen Beseitigung (insgesamt 18.000 t) aufgeführt sind. Die Obergrenze liegt also unter 90.000 t. An zweiter Stelle liegen anorganisch verunreinigtes Sägemehl bzw. Sägespäne mit insgesamt ca. 50.000 t. Weiterhin kommen organisch verunreinigte Holzabfälle und Sägemehl hinzu, jedoch nur in kleinem Umfang. Beide Abfallarten sind statistisch nicht einzeln, sondern zusammen mit der außerbetrieblichen Beseitigung ausgewiesen. Die Summe liegt in beiden Fällen jedoch unter 10.000 t. Die Gesamtmenge der Holzabfälle dürfte also zwischen 120.000 und 160.000 t liegen.

An *Verpackungsmaterialien* wurden ca. 10.000 t organisch verunreinigte und 9.000 t anorganisch verunreinigte deponiert, zusammen also knapp 20.000 t.

Schwer abzuschätzen ist die Menge organisch abbaubaren, als Sondermüll eingestuft *Klärschlamm*s aus der betrieblichen Abwasserreinigung. Die Gesamtmenge an Sonderabfall-Klärschlamm beträgt 1,8 Mio. t (einschließlich Wasseranteil), wovon ca. 350.000 t deponiert werden. Mit einem Wasseranteil von 70 % gerechnet (wie er bei den nicht als Sonderabfall eingestuften Klärschlämmen angegeben ist), sind das gut 100.000 t Trockensubstanz. Es handelt sich hierbei allerdings zum weitaus größten Teil um anorganische Schlämme oder - soweit organisch - um biologisch nicht abbaubare, wie z. B. mineralöhlhaltige aus der Tankreinigung. Der Anteil der organischen (und darunter der biologisch abbaubaren) ist zwar nicht zu quantifizieren, er dürfte aber sehr klein sein. Größere Mengen an biologisch abbaubaren industriellen Klärschlämmen fallen nur in der Zellstoff- und Zuckerindustrie an, die jedoch nicht als Sonderabfall eingestuft werden. Die biologisch abbaubaren Mengen dürften daher weit unter der Gesamtmenge von 100.000 t liegen, vermutlich im Bereich zwischen 0 und 30.000 t.

Bei der Klärschlamm-Bilanz gibt es insofern noch eine statistische Unsicherheit, als von den 1,8 Mio t Klärschlämmen 700.000 t als "zur außerbetrieblichen Beseitigung abgegeben" aufgeführt sind, die aber weder bei den öffentlichen Entsorgungsanla-

gen noch bei jenen Dritter wieder erscheinen. Die statistischen Unsicherheiten dürften auf die schwierige Datenverfügbarkeit des Umbruchjahres 1990 zurückzuführen sein und sind in der 1993er Statistik bereinigt (Statistisches Bundesamt, 1996). Auch unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten dürfte die Menge an biologisch abbaubarer Trockensubstanz 100.000 t nicht übersteigen, sondern wahrscheinlich weit darunter liegen.

Die Gesamtmenge an biologisch abbaubarem Sondermüll aus Holz, Pappe und Klärschlämmen dürfte 1990 also zwischen 150.000 t und maximal 300.000 t gelegen haben. Das ist in jedem Fall weniger als 1 % der insgesamt abgelagerten Hausmüllmenge von ca. 30 Mio. t im gleichen Jahr.

Gleiche Methanbildungsrate unterstellt, würde also weniger als 1 % der Methanbildung in Deponien von den Sonderabfällen stammen. Bei einer gesamten Methanbildung von 3 Mio. t im Jahr 1990 wären es also weniger als 30.000 t. Es wäre jedoch zu klären, welche Anteile der mit Sonderabfallstoffen kontaminierten organischen Substanz für den biologischen Abbau überhaupt zugänglich sind. Die Mikroorganismen reagieren empfindlich auf die Milieu-Bedingungen in der Deponie, so daß zumindest eine Verlangsamung der Abbaugeschwindigkeit unterstellt werden darf. Bei gleichem Emissionsgrad wie bei den Hausmülldeponien (Gesamtemission 1990: knapp 1,8 Mio t) ergeben sich daraus Emissionen von unter 18.000 t/a.

Hinzuweisen ist aber darauf, daß die Abschätzung der Methanbildung und -emission aus Deponien generell mit großen Unsicherheiten verbunden ist. Der vergleichsweise geringe Beitrag der genannten Mengen von Sonderabfällen zur Methanbildung und -emission verschwindet damit in der Schätzungenauigkeit. Zwar ist damit auch der Beitrag der TA Abfall zur CH<sub>4</sub>-Emissionsminderung quantitativ nicht erfaßbar, sollte aber in der qualitativen Diskussion nicht vernachlässigt werden.

### **2.1.2.3      Zusage des deutschen Steinkohlenbergbaus zur verstärkten Grubengasnutzung**

Bei der Steinkohlenförderung fällt Methan an, das aus sicherheitstechnischen Gründen abgeführt werden muß. Gut 60 % der Methanmengen werden derzeit (Stand 1993) über die Wetter abgeführt. Aus Sicherheitsgründen muß der Methangehalt in den Wettern sehr niedrig sein (< 1 bis 1,5 Vol.-%), was eine Verwertung erschwert. Knapp 40 % werden direkt in der Grube abgesaugt. Die Methankonzentration dieser Gasmengen ist höher (> 25 Vol.-%), so daß eine Verwertung möglich ist. Derzeit werden aber - insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen - noch erhebliche Anteile davon direkt in die Atmosphäre abgeblasen, also "kalt abgefackelt".

Die deutsche Steinkohlenwirtschaft hatte im Jahr 1990 ein Konzept zur verstärkten Nutzung von Grubengas vorgelegt (Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus 1990). Danach sollte der Nutzungsgrad des als Grubengas abgesaugten Methans von 70 % im Jahr 1989 auf 78 % gesteigert werden. Eine zusätzliche Verwertungsanlage sei Anfang 1990 realisiert worden, drei weitere seien in der Planung gewesen. In einer Stellungnahme von Anfang 1995 (Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus 1995) gab die Steinkohlenwirtschaft bekannt, daß diese Zusagen erfüllt (zugesagte prozentuale Werte exakt erreicht) und damit die Methanemissionen des Steinkohlenbergbaus um über 30 % gesenkt worden seien.

In ihren beiden Erklärungen verweist die Steinkohlenwirtschaft darauf, daß insbesondere auch wirtschaftliche Probleme das Ausmaß der Grubengasnutzung bestimmen und über den erreichten Stand hinausgehende Methan-Minderungsmaßnahmen aus wirtschaftlichen Gründen nicht vertretbar seien.

Um die Wirkung der bereits umgesetzten freiwilligen Maßnahme zu quantifizieren, ist also die spezifische  $\text{CH}_4$ -Emission pro Tonne geförderter Steinkohle heranzuziehen, die dem von der Steinkohlenwirtschaft ausgewiesenen Stand von 1993 (nach Erfüllung der Zusagen von 1990; Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus 1995) entspricht. Indes kann unterstellt werden, daß durch Einsatz geeigneter Instrumente die nach wie vor bestehenden Emissionminderungspotentiale teilweise genutzt werden können (vgl. hierzu die Ausführungen zu weiteren in Betracht zu ziehenden Maßnahmen und die Berechnung der Szenarien weiter unten).

### **2.1.3 Maßnahmen betreffend $\text{N}_2\text{O}$**

Hier ist nur eine Maßnahme zu nennen, die ausschließlich auf die Minderung von  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen abzielt. Dabei handelt es sich um eine freiwillig ergriffene Maßnahme der Wirtschaft.

#### **2.1.3.1 Freiwillige Maßnahmen zur Abgasreinigung bei der Adipinsäureproduktion**

Adipinsäure ist vor allem ein wichtiges Vorprodukt für Kunstfasern (Nylon 6.6). Aus Deutschland stammte im Jahr 1990 mit rund 211 kt gut ein Zehntel der Weltproduktion. Davon produzierte die BASF AG rund 154 kt - die dortige Produktionskapazität wurde mittlerweile ausgebaut - und die Bayer AG rund 55 kt. Hinzu kam eine geringe Produktionsmenge von rund 1,8 kt im Leuna-Werk in der ehemaligen DDR.

Bei den gängigen Herstellverfahren entsteht Distickstoffoxid als Bestandteil des Produktionsabgases. Die spezifische Emission von  $\text{N}_2\text{O}$  beträgt rund 330 kg pro

Tonne Adipinsäure, wenn, wie es bis vor kurzem in Deutschland noch der Fall war, keine emissionsmindernden Maßnahmen ergriffen werden. Somit betrugen die  $N_2O$ -Emissionen aus der Adipinsäureherstellung in Deutschland im Basisjahr 1990 rund 70 kt.

Nach Angaben der Bayer AG (1994, 1995) wurde im Jahr 1993 in ihrem Werk in Uerdingen eine erdgasbetriebene thermische Zersetzungsanlage für  $N_2O$  aus der Adipinsäureproduktion in Betrieb genommen. Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Ausmauerung arbeitet die Anlage mittlerweile problemlos. Durch Nutzung der exothermen Zersetzungsreaktion von  $N_2O$  zu Stickstoff und Sauerstoff ergibt sich ein Wirkungsgrad der Heizdampferzeugung von ca. 1,0 bezogen auf den Einsatz von Erdgas. Abgesehen von der nahezu vollständigen  $N_2O$ -Zersetzung bedeutet dies einen zusätzlichen ökologischen Nutzen im Vergleich zur Wärmeerzeugung in einer konventionellen Erdgasfeuerung.

Zur Zeit entwickelt die BASF AG nach ihren Angaben (1994, 1995) wirksame Katalysatoren für eine katalytische  $N_2O$ -Zerlegung mit (gegenüber den thermischen Verfahren geringerer, aber am Standort Ludwigshafen auch nicht nutzbarer) Dampfgewinnung, testet Pilot-Anlagen mit Produktionsabgasen und erarbeitet das erforderliche Verfahrenskonzept. Das Unternehmen strebt an, je nach technischer Zuverlässigkeit, ein langjähriges  $N_2O$ -Minderungspotential in der Größenordnung von 90 bis 95 % zu erreichen. Bei erfolgreichem Abschluß der Entwicklungsarbeiten und Behördengenehmigung hofft das Unternehmen auf eine Inbetriebnahme der  $N_2O$ -Zersetzungsanlage bis spätestens im Jahr 1999. Nach neueren Angaben der BASF soll eine Reduzierung der Emissionen um mindestens 90 % bereits im Jahr 1998 erreicht werden. Die Investitionskosten für die Anlage belaufen sich auf mehr als 12 Millionen DM (Chemische Rundschau, 1997; Entsorgungspraxis, 1997).

Nach der mittlerweile erfolgten Stilllegung der Leuna-Anlage ist gemäß Herstellerangaben (Bayer; BASF, 1997) eine künftige Adipinsäure-Produktion von rund 300 kt/a in der Bundesrepublik zu erwarten. BASF rechnet in den nächsten Jahren nämlich mit einer hohen Auslastung der gegenüber 1990 ausgebauten Produktionskapazität. Bayer geht indes nicht von einer größeren Produktionsausweitung aus. Die derzeit genehmigte Produktionskapazität liegt bei zusammen 325 kt/a.

Damit ergibt sich als Folge beschlossener und teilweise bereits umgesetzter Maßnahmen (*Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario*; siehe auch die Ausführungen zu den Szenarien in diesem Bericht) ein in zwei Stufen eintretender Rückgang der Emissionen in der Bundesrepublik. Unter der Annahme einer an den beiden Standorten zu erzielenden Emissionsminderung von durchschnittlich 90 bis 95 %, die übliche Ausfallzeiten der Emissionsminderungsanlagen berücksichtigt, gingen die Emissionen bei erwarteter Produktionsentwicklung bzw. unter Zugrundelegung der Genehmigungs-Obergrenze rechnerisch etwa ab 1995 (Aufnahme des optimierten Dauerbetriebs der thermischen Zersetzung bei Bayer) auf 70 kt/a zurück

und dürften sich ab 1999 oder früher (Zeitpunkt des optimierten Dauerbetriebs der katalytischen Zersetzung bei BASF) weiter auf gut 5 bis 11 kt/a verringern. Die gegenüber dem Basisjahr 1990 zu erwartende  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionsminderung liegt damit trotz einer unterstellten Produktionssteigerung um 45 bis 55 % bei 85 bis 93 % des Ausgangswertes.

Bezüglich der Freisetzung von  $\text{N}_2\text{O}$  existieren derzeit keine gesetzlichen Regelungen. Die bereits ergriffenen bzw. beabsichtigten Maßnahmen zur Emissionsminderung beruhen (zumindest bislang) auf freiwilliger Basis. Im Falle, daß von staatlicher Seite verbindliche Emissionsminderungsziele formuliert werden, sollte nach Ansicht der betroffenen Unternehmen berücksichtigt werden, daß die Emissionsminderungsanlagen keine 100 %ige Verfügbarkeit aufweisen können. Dementsprechend sollten, wie bei der obigen Emissionsschätzung unterstellt, angemessene Ausfallzeiten für Revisionsarbeiten ohne Abschaltung der Produktionsanlagen zugestanden werden. Dies bedeutet, daß darüber hinausgehende Emissionsminderungen unrealistisch erscheinen, das Emissionsminderungspotential also mit den ergriffenen bzw. geplanten Maßnahmen ausgeschöpft sein dürfte.

Der Umstand, daß es weltweit nur wenige bedeutende Hersteller von Adipinsäure gibt und damit der Maßnahmenbedarf sehr überschaubar ist, sollte zu der Hoffnung Anlaß geben, daß die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen aus diesem Bereich mittelfristig auch weltweit an Bedeutung verlieren, zumal insbesondere an verschiedenen Produktionsstandorten in den USA bereits Emissionsminderungseinrichtungen betrieben werden. Tatsächlich haben große Adipinsäure-Hersteller vereinbart, ihre Emissionen bis 1996-98 weitgehend zu reduzieren.

## **2.1.4 Maßnahmen betreffend NMVOC**

### **2.1.4.1 Vorbemerkungen und Rahmendaten**

Neben der Erfassung von NMVOC-Emissionen für die unterschiedlichen Prozesse ist die Fortschreibung dieser Prozesse äußerst kompliziert, da bei vielen Anwendungsfeldern keine geeigneten Parameter für die Fortschreibung existieren.

Ein Schwerpunkt konnte daher in den hier vorliegenden Analysen nur auf den Bereich der NMVOC-Emissionen bezüglich der Bereitstellung von Ottokraftstoff und der Lösemittelverwendung gelegt werden.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Entwicklung der Aktivitätsparameter für die Szenarienentwicklung gezeigt.

Diese Parameter wurden überwiegend aus den Szenarienentwicklungen für das IKARUS-Modell und den Arbeiten von Prognos AG (1995) entnommen. Bei denjenigen Prozessen, für die keine Angaben verfügbar waren, wurden die Aktivitätsparameter auf dem Stand des Basisjahres gehalten, soweit dies plausibel war.

Tabelle 3: Entwicklung der Aktivitätsparameter für ausgewählte Prozesse (1990=100 %)

	1990	2005	2020
	1990=100%		
Ottokraftstoff-Verteilung	100%	102%	77%
Industrieprozesse			
<i>Raffinerieeinsatz</i>	100%	110%	99%
<i>Walzstahl</i>	100%	120%	149%
<i>Eisen-, Stahl- und Temperguß</i>	100%	72%	64%
<i>Steinkohle-Verkokung</i>	100%	93%	86%
<i>Bitumen-Mischgut</i>	100%	100%	100%
<i>Organische Produkte</i>	100%	100%	100%
<i>Brotherstellung</i>	100%	166%	197%
<i>Bierherstellung</i>	100%	166%	197%
<i>Weinherstellung</i>	100%	166%	197%
<i>Zuckerherstellung</i>	100%	119%	100%
<i>Spanplattenproduktion</i>	100%	100%	100%
Lösemittelverwendung			
<i>Lackierung</i>	100%	100%	100%
<i>Entfettung, Chemische Reinigung</i>	100%	100%	100%
<i>Herstellung und Anwendung chem. Produkte</i>	100%	100%	100%
<i>Übrige Lösemittelverwendung</i>	100%	100%	100%
FCKW	100%	0%	0%
HALONE	100%	0%	0%
Quelle: Eigene Schätzungen			

In bezug auf den Benzinumsatz in Deutschland zeigt die Entwicklung - angesichts der nur geringfügigen Effizienzerhöhung des Verkehrssektors - deutlich, daß von einer erheblichen Substitution von Ottokraftstoffen durch Dieselloststoffen ausgegangen wird (Prognos 1995). Neben der Benzindistribution ist die Schätzung für die Entwicklung im Raffineriesektor relativ robust, setzt sie doch ebenfalls auf eine detaillierte Energiebedarfsprognose auf.

Völlig anders stellt sich die Situation für die Lösemittelverwendung dar. Da solche Prozesse nur äußerst selten speziellen Wirtschaftssektoren zugeordnet werden können, muß hier prinzipiell auf Mengenschätzungen für die NMVOC-Emissionen zurückgegriffen werden.



### 2.1.4.2 Maßnahmenquantifizierung

Für den hier behandelten Bereich der NMVOC-Emissionen wird eine Wirkungsschätzung nur für die Bereiche der Lackierung sowie die Verteilung von Ottokraftstoffen vorgenommen.

### 2.1.4.4 Lackierung

Nach einer Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes (Bräutigam 1992) wurde für den Verbrauch von Lösemitteln bei der Anwendung von Lacken für die BRD im Jahre 1986 ein Wert von 474.000 Mg ermittelt.<sup>3</sup> Es wird geschätzt, daß von dieser Einsatzmasse 417.000 Mg ohne chemische Veränderung frei wurden. Wesentliche Abnehmer der Lackindustrie sind die Branchen:

- Maschinenbau
- Elektrotechnische Industrie
- Straßenfahrzeugbau
- Eisen-, Blech- und Metallwaren (EBM)
- Holzverarbeitende Industrie
- Bauhauptgewerbe (Hochbau)

Die Produktion von Farben und Lacken folgt dabei nach empirischen Erkenntnissen dem Nettoproduktionsindex der fünf erstgenannten Branchen, die Produktion von Dispersionsfarben für Innen- und Außenanwendungen, Putzen und Grundierungen folgt in etwa dem Nettoproduktionsindex des Hochbaus (siehe folgende Abbildungen).

Geht man davon aus, daß die Emissionen überwiegend nicht aus den Materialien entstehen, die im Hochbau eingesetzt werden, und schätzt diese deshalb auf der Basis der Emissionen von 1986 über eine Extrapolation der Nettoproduktionsindices der fünf Branchen, so ergibt sich das *Ohne-Maßnahmen-Szenario*.

Ergebnis dieser extrem groben Extrapolation ist eine Steigerung der Lösemittel-emissionen bei der Anwendung von Farben und Lacken bis zum Jahre 2020 auf ca. 750.000 Mg/a, gemäß den Daten des Umweltbundesamtes, und auf ca. 500.000 Mg/a, wenn man eine Trendabschätzung auf den Daten des Deutschen Lackinstitutes aufbaut und von einer Emission von 90 % der

---

<sup>3</sup> Aufgrund der schlechten Datenlage und des geringen Verursacher-Anteils der neuen Bundesländer beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen zunächst nur auf die alten Bundesländer.

Abbildung 2: Produktion von Farben und Lacken im Vergleich zum Nettoproduktionsindex von fünf Industriebranchen

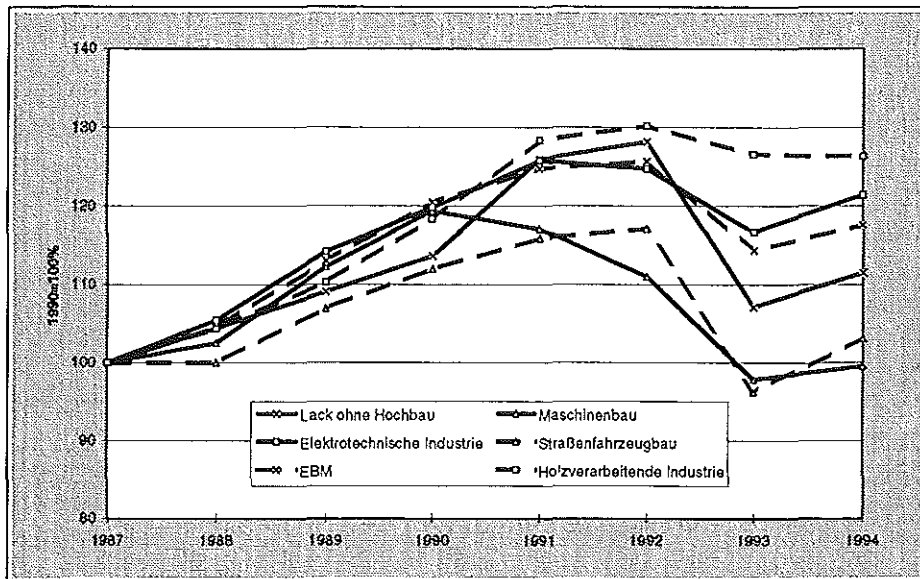
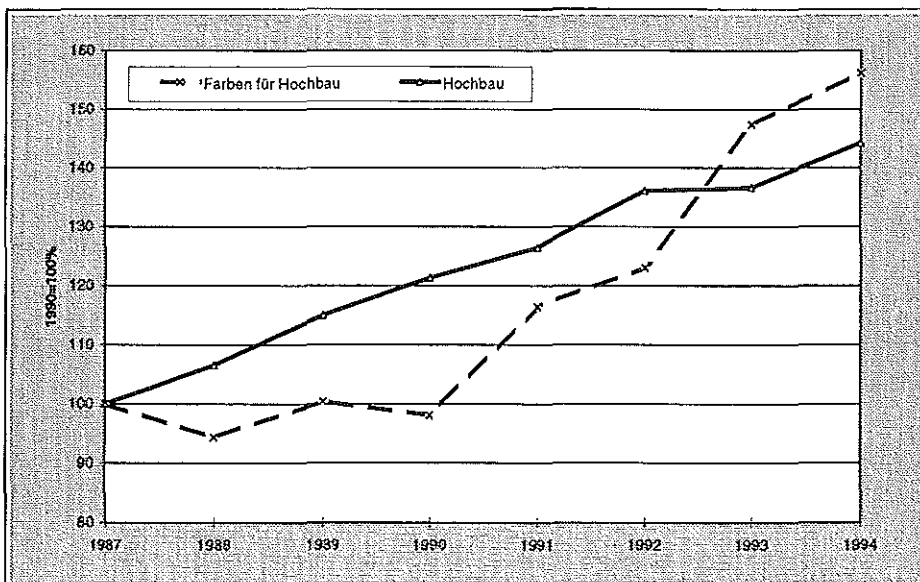


Abbildung 3: Produktion von Baufarben im Vergleich zum Nettoproduktionsindex des Hochbaus



Lösemittleinsatzmasse ausgeht (DLI 1995, Nr. 6). Eine Bereinigung bzgl. Im- und Exporten wurde nicht vorgenommen, da nur ein Exportüberschuß von ca. 5 bis 8 % der Produktionsmassen vorliegt, was in Anbetracht der Unsicherheit der Ausgangsdaten kaum von Bedeutung ist.

Die Entwicklung des *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenarios* basiert auf einer summarischen Schätzung des Umweltbundesamtes.

Diese summarische Schätzung bezieht die folgenden (beschlossenen und umgesetzten) Instrumente in die Analyse ein:

- TA Luft '86 (mit teilweise enthaltenen Dynamisierungsklauseln)
- Novelle der 2. BImSchV vom 2. Dezember 1990
- Prädikatisierung lösemittelarmer Produkte mit dem Umweltzeichen ZU 12a
- Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS 610)

Mit den beschlossenen Maßnahmen wurde eine Senkung der *Lösemittlemissionen aus der Anwendung von Farben und Lacken* von 15 % im Jahre 1995 abgeschätzt (UBA 1993).

Eine Fortschreibung dieser Entwicklung - ohne zusätzliche Maßnahmen - führt zu einer Begrenzung der *gesamtdeutschen* Emissionen auf ca. 430.000 Mg NMVOC im Jahre 2005. Dieser Wert wird auch für das Jahr 2020 angesetzt.

Das genannte Maßnahmenpaket kann daher in grober Schätzung mit ca. 100.000 Mg NMVOC quantifiziert werden.

Das technische Potential für weitere Maßnahmen folgt einer Abschätzung des UBA. Hier wird davon ausgegangen, daß die NMVOC-Emissionen aus dem Lösemittelgebrauch bis zum Jahr 2005 im Vergleich zu 1986 um maximal 70 % gesenkt werden könnten (Große-Opphoff 1996).

#### **2.1.4.4 Verteilung von Ottokraftstoff**

Die Trendabschätzungen beruhen auf den Trendabschätzungen der Prognos AG zum Energieverbrauch der BRD bis zum Jahre 2020 (Prognos 1995) für den Bereich des Straßenverkehrs. Für die Verteilung von Ottokraftstoff zu anderen Zwecken (stationär betriebene Motoren) soll kein eigenes Modell herangezogen werden.

Die Trendabschätzung von Prognos geht u.a. davon aus, daß im relevanten PKW-Bereich:

- a) keine Vorrangpolitik zu Gunsten der Eisenbahnen und des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs durchgeführt wird,

- b) der Einsatz von LPG, LNG (Flüssiggas), Strom und Wasserstoff nur eine untergeordnete bis keine Rolle spielt,
- c) die Relation von Treibstoffpreisen zu den Einkommen keinen Sparanreiz darstellt,
- d) das Preisverhältnis von Benzin zu Diesel unverändert bleibt,
- e) die Entwicklung der Einkommen steigende Motorisierungsgrade erlaubt (60 % bis 2010),
- f) das Wirtschaftswachstum in Verbindung mit der Zunahme der Arbeitsteilung und den steigenden Realeinkommen einen Zuwachs der Verkehrsleistung (1992 bis 2010 um 28 % im Personenverkehr) und des KFZ-Bestandes (40 Mio. KFZ 1994 zu 40 Mio. KFZ 2020) erlaubt,
- g) die spezifischen Energieverbräuche für Neufahrzeuge deutlich abnehmen, ein Verbrauch von 3 l auf 100 km im Durchschnitt jedoch nicht erreicht wird (von 7,5 kg/100 km auf 4,4 kg/100 km in 2020).

Für die Abschätzung der *bereits ergriffenen* Maßnahmen, der

- 20. BImSchV sowie der
- 21. BImSchV

wird als Fall *Ohne Maßnahmen* unterstellt, daß diese Instrumente nicht wirken würden und bis 2020 eine spezifische Emission von 6,3 kg NMVOC-Emissionen pro Mg ausgeliefertem Ottokraftstoff anzusetzen ist.

Gemäß der zugrundeliegenden Trendabschätzung der Prognos AG ergibt sich für das Jahr 2005 eine NMVOC-Emission von ca. 200.000 Mg/a. Im Jahre 2020 ergäbe sich aufgrund des sinkenden Benzin-Anteils *Ohne Maßnahmen* eine Emissionsmenge von ca. 150.000 Mg.

Die Wirkung von Reduktionsmaßnahmen soll hier anhand einer einfachen Abschätzung unter verschiedenen Bedingungen betrachtet werden.

Allen Trendabschätzungen liegen die Trendabschätzungen der Prognos AG zur Entwicklung der Absatzmassen an Ottokraftstoff zugrunde. Weiterhin ist allen Abschätzungen gemeinsam, daß folgende Stationen bzw. Positionen im Kraftstofffluß berücksichtigt werden:

- Lagerung bei der Raffinerie
- Verladung aus Binnenschiff, Eisenbahnkesselwagen, LKW
- Transport zum Verteilungslager
- Lagerung im Verteilungslager (incl. Abladen)
- Verladung aus LKW
- Transport mit LKW

- Abladen an der Tankstelle
- Betanken der KFZ
- Verschütten beim Betanken
- diffuse Emissionen
- unfallbedingte Freisetzen

Die Berechnungsdaten sind den entsprechenden Rechtsvorschriften und dem Atmospheric Emission Inventory for Europe entnommen (CORINAIR 1996).

Die Wirkungsschätzung für die 20. Und 21. BImSchV gehen von einer dreistufigen Überlegung aus:

1. Die Variante *Nach Verordnung* geht davon aus, daß die Maßnahmen gemäß der 20. und 21. BImSchV realisiert werden, ohne daß zusätzlich an der Transport-, Be- und Entladungstechnik Verbesserungen vorgenommen werden. So wird z.B. die Beladung auf Kesselwagen zwischen der Top-Ladung und der Ladung über Eintauchrohre zu gleichen Teilen angenommen, eine Ballastwasserübernahme der Binnenschiffe zu 100 % und 30 % ebenfalls zu gleichen Teilen etc.
2. Die Trendabschätzung *Medium* geht davon aus, daß über die Verordnungen hinaus Verbesserungen an der Ladetechnik bzw. Be- und Entladetechnik vorgenommen werden. Beispielsweise wird unterstellt, daß Kesselwagen nur noch von unten beladen werden und Binnenschiffe keine Emissionen durch Ballastwasserübernahme verursachen.
3. Die Trendabschätzung *Optimum* geht davon aus, daß zusätzlich ab 1995 neue PKW mit eingebauten Adsorbern für die Betankungsdämpfe ausgerüstet werden. Letztgenannte Maßnahme soll bis 2005 voll wirksam werden. Die Emissionsminderung bei der Betankung steigt dadurch von 50 % auf 95 %.

Die Schätzung *Nach Verordnung* ergibt bis zum Jahr 2000 eine Reduktion der VOC Emissionen auf ca. 41.000 Mg/a. Wegen des angenommenen Rückgangs beim Verbrauch von Ottokraftstoff ergibt sich danach bis 2020 ein Rückgang der Emissionen auf ca. 31.000 Mg/a.

Die Trendabschätzung *Medium* ergibt bis zum Jahr 2005 eine Reduktion der VOC Emissionen auf ca. 36.000 Mg/a. Wegen des unterstellten Rückgangs beim Verbrauch von Ottokraftstoff ergibt sich danach bis 2020 ein Rückgang der Emissionen auf ca. 27.000 Mg/a.

Die Trendabschätzung *Optimum* ergibt bis zum Jahr 2000 eine Reduktion der VOC Emissionen auf ca. 25.000 Mg/a. Bis zum Jahr 2005 wird eine Reduktion der Emissionen auf ca. 12.500 Mg/a erreicht. Wegen des von Prognos abgeschätzten Rückgangs beim Verbrauch von Ottokraftstoff ergibt sich danach bis 2020 ein Rückgang der Emissionen auf unter 10.000 Mg/a.

Die Minderungswirkung der 20. und 21. BImSchV kann daher zum heutigen Zeitpunkt - und vorbehaltlich weiterer Erfahrungen bei der Umsetzung - im Mittel mit 160.000 Mg NMVOC in 2005 und 120.000 Mg in 2020 quantifiziert werden.

## **2.1.5 Maßnahmen betreffend nichtenergiebedingtes CO<sub>2</sub>**

### **2.1.5.1 Vorbemerkungen und Rahmendaten**

Die bisher beschlossenen und umgesetzten Maßnahmen des CO<sub>2</sub>-Minderungsprogramms berücksichtigen die nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nur am Rande. Aus diesem Grund lassen sich natürlich die entsprechenden Emissionsminderungseffekte nur auf wenigen Feldern ermitteln.

Eine direkte Wirkung auf die Emissionen von nichtenergiebedingtem Kohlendioxid kann nur für die auf ein verstärktes Stoffrecycling orientierten Instrumente abgeschätzt werden. Auch kann eine solche Wirkungsschätzung nur im Bündel verschiedener Maßnahmen erfolgen.

In einem solchen Verbund entfalten bis zum Jahr 2005 das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz sowie die Verpackungsverordnung ihre Wirkung (IMA-Liste Nr. 65 und 68).

Beide Verordnungen entfalten ihre Wirkung bezüglich nichtenergiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen vor allem über ein verstärktes Recycling von Glas und Aluminium.

Der damit induzierte sinkende Bedarf an Hüttenaluminium wird indes durch die Tendenz überlagert, daß die Aluminiumverhüttung aus verschiedenen Gründen ins Ausland verlagert wird und Fertigprodukte oder Halbzeuge aus Aluminium importiert werden. Aus diesem Grunde kann die Wirkung der genannten politischen Instrumente bzgl. *Aluminium* nicht weiter quantifiziert werden.

Grundlage der Projektionen für die nicht-verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind die den Berechnungen des UBA zugrundeliegenden Produktionszahlen für die Jahre 1989/90. Sie wurden mit Hilfe von Angaben des ISI über die Entwicklung des Produktionsvolumens dieser Prozesse in den Jahren 2005 und 2020 fortgeschrieben. Dabei wurden alte und neue Bundesländer differenziert betrachtet. Die folgende Tabelle zeigt die Dynamik der Aktivitätsparameter.

Tabelle 4: Produktionsentwicklung für ausgewählte Güter

	NBL				ABL			
	1989	1990	2005	2020	1989	1990	2005	2020
	1990=100%							
Zementklinker	165%	100%	107%	107%	96%	100%	88%	79%
Kalk	227%	100%	58%	53%	102%	100%	94%	87%
Hüttenaluminium	270%	100%	0%	0%	103%	100%	56%	28%
Glas	109%	100%	185%	185%	90%	100%	134%	147%
Kalziumkarbid	187%	100%	0%	0%	118%	100%	47%	26%
Ammoniak	140%	100%	23%	15%	104%	100%	126%	114%
Soda	184%	100%	100%	89%	100%	100%	69%	59%

Bezogen auf die einzelnen Prozesse ergibt sich folgendes Bild. Die Produktion von Hüttenaluminium wird deutlich reduziert: in den alten Bundesländer bis 2005 um -46 % und um -72 % gegenüber dem Wert von 1990 bis zum Jahr 2020. In den neuen Bundesländern wurde die Produktion von Hüttenaluminium vollständig eingestellt.<sup>4</sup> Gleiches gilt für die Produktion von Kalziumkarbid: deutliche Produktionsrückgänge in den alten Bundesländern (-53 % bzw. -74 %), vollständige Produktionseinstellung in den neuen Bundesländern. Lediglich beim Glas zeigt sich eine andere Situation: sowohl in den alten als auch den neuen Bundesländern ist eine deutliche Steigerung der Produktion zu erwarten.

#### 2.1.5.2 Maßnahmenquantifizierung

Nachfolgend wird die Wirkung der Maßnahmen im Bereich der Glasproduktion abgeschätzt. Für alle anderen Prozesse können keine Quantifizierungen vorgenommen werden, so daß von einem konstanten Faktor für die Emission von nichtenergiebedingtem CO<sub>2</sub> je Tonne Produkt ausgegangen werden muß.

#### Glasproduktion

Die Quantifizierung der emissionsmindernden Wirkung der o.g. Vorschriften hinsichtlich des Glaseinsatzes wird wie folgt vorgenommen.

Aus den Daten zur mittleren Zusammensetzung von Gläsern lassen sich die zu erwartenden, nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen errechnen, wenn unterstellt wird, daß Barium-, Calcium-, Kalium-, Magnesium- und Natriumoxid aus den entsprechenden Carbonaten gewonnen werden:

<sup>4</sup> Diese Produktionsentwicklung ist offensichtlich Ausdruck von Tendenzen der bundesdeutschen Aluminiumindustrie, die Produktion von Primäraluminium ins Ausland zu verlagern und statt dessen in der Bundesrepublik vor allem Sekundäraluminium zu verarbeiten.

Tabelle 5: Emissionsfaktoren für Kohlendioxid für verschiedene Glassorten

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	PbO	CO <sub>2</sub> kg/t
Fensterglas	-	-	-	-	70,7	-	43,7	99,4	-	213,7
Flaschenglas	-	-	-	-	78,6	2,8	1,1	99,4	-	181,8
Lampenröhren	-	-	-	-	-	42,1	-	28,4	-	70,5
Glühlampenglas	-	-	-	-	39,3	-	43,7	120,6	-	203,6
Wirtschaftsglas	-	-	-	-	62,9	2,3	-	102,9	-	168,1
Isolierfaserglas	-	-	-	-	137,5	-	49,1	-	-	186,6
Bildröhrenkol- benglas I	-	-	-	37,3	-	37,4	-	56,8	-	131,5
Bildröhrenkol- benglas II	-	-	-	-	23,6	37,4	21,8	42,6	-	125,4
Bildschirmglas	-	-	-	5,7	15,7	42,1	10,9	49,7	-	124,2

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Für die Berechnung der zu erwartenden Emissionen sind neben den sortenspezifischen Emissionsfaktoren noch die Anteile des Recyclings zu berücksichtigen.

Tabelle 6: Ausgangswerte für die Bestimmung der Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Recyclingquote für Glas

Produktion			Recyclingquote
Flachglas		17%	95% 70% 60% 50%
veredeltes Flachglas		11%	
Hohlglas		68%	
	grüne Flaschen	17%	
	braune Flaschen	11%	
	weiße Flaschen	20%	
	Konservengläser	9%	
	Glaskolben	2%	
	Glasröhren	1%	
	Rest	8%	
Glasfasern mindestens		4%	
Summe		100%	

Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts

Unter Zugrundelegung dieser Produktionsverteilung und der gezeigten Recyclingquoten ergibt sich für das Jahr 2005 ein mittlerer Emissionsfaktor von 116 kg CO<sub>2</sub> je Mg.

Der quantifizierbare Effekt durch erhöhtes Glasrecycling beträgt so unter Zugrundelegung der Produktionsektwicklung für Glas im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* ca. 170.000 t CO<sub>2</sub>.



## 2.2 Weitere in Betracht gezogene Maßnahmen

### 2.2.1 Maßnahmen betreffend CH<sub>4</sub>

Falls die bereits beschlossenen Maßnahmen, insbesondere die TA Siedlungsabfall, auch tatsächlich wie geplant umgesetzt werden, verringern sich die CH<sub>4</sub>-Emissionen schon im Referenzfall beträchtlich. Gleichzeitig kommt es zu Verschiebungen in der Reihenfolge der Hauptemittenten: Den hier erarbeiteten Ergebnissen zufolge verlieren nach der Jahrtausendwende die Abfalldeponien an Bedeutung und etwa ab dem Jahr 2005 tritt bei unterstellter Fördermenge von 35 Mio. t/a die Steinkohlenförderung an die zweite Stelle hinter den Bereich Landwirtschaft/Viehzucht. Die viehhaltungsbedingten Emissionen dürften sich durch verstärkte Biogasnutzung verringern und hängen in starkem Ausmaß vom Milch- und Fleischkonsum ab. Allerdings sind Veränderungen in diesen Größen nur schwer abschätzbar und erscheinen gegenwärtig kaum steuerbar. Daher sind weitere Maßnahmen zur CH<sub>4</sub>-Reduktion v. a. im Steinkohlenbergbau zu suchen.

#### 2.2.1.1 Verstärkte Grubengasnutzung im Steinkohlenbergbau

Im Steinkohlenbergbau kommen als weitergehende technische Maßnahmen eine Erhöhung der Gasabsaugung und des Anteils des verwerteten Grubengasanfalls in Frage.

Durch die *Erhöhung des Gasanteils, der bei der Kohleförderung abgesaugt wird* und energetisch nutzbar ist, sinkt der Anteil des Gases, der in die Wetter gelangt und überwiegend in die Atmosphäre emittiert wird. Konkret könnten z. B. eine verstärkte Vorabsaugung von Bauflözen oder eine Optimierung der Hangend-Liegend-Bohrlöcher erfolgen.

Darüberhinaus werden durch die *Erhöhung des verwerteten Anteils des abgesaugten Gases* die CH<sub>4</sub>-Emissionen weiter verringert. Bislang werden nämlich erhebliche Anteile des abgesaugten Grubengases noch unverbrannt über die "Kaltfackel" an die Atmosphäre abgegeben. Ein wesentliches Hemmnis einer Verwertung, die im Ruhrgebiet in deutlich geringerem Umfang als in den anderen Abbaurevieren praktiziert wird, ist gegenwärtig die - im Verhältnis zum Fremdbezug - relativ geringe Wirtschaftlichkeit der Gasverwertung, z. B. in BHKWs.

Geeignete Instrumente, die eine Erhöhung des verwerteten Grubengasanteils bewirken könnten, müssten diesen Umstand angemessen berücksichtigen. Die Einbeziehung der Stromerzeugung aus Grubengas in das Stromeinspeisungsgesetz bzw. eine zu ähnlichen Vergütungen führende Lösung könnte dieses wesentliche Hemmnis erheblich verringern.

Aufgrund des Vorhandenseins entsprechender Technologien und der vergleichsweise geringen Anzahl der Anwendungsfälle könnten diese Maßnahmen technisch relativ kurzfristig zum Einsatz kommen, so daß die Wirkung dieser Maßnahmen bereits in den Werten für das Jahr 2005 eines "Politikszenarios" (*Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario*), in welchem der Einsatz weitergehender Maßnahmen unterstellt wird, einrechenbar ist.

Die Wirkung hängt zum einen von der Intensität der zu treffenden Maßnahmen und zum anderen von der Bereitschaft zu weiteren Investitionen ab. Unter Zugrundelegung plausibel erscheinender Annahmen wurde in Abschnitt 3.1 die Emissionsminderung im Falle eines *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenarios* errechnet.

## 2.2.2 Maßnahmen betreffend N<sub>2</sub>O

Die Umsetzung der bereits beschlossenen Maßnahmen dürfte schon zu erheblichen Reduktionen der N<sub>2</sub>O-Emissionen führen. Zugleich kommt es dadurch zu einer Veränderung in der Struktur der Emittenten: Bedingt durch die zu erwartenden erheblichen Minderungserfolge bei der Adipinsäureherstellung nimmt der prozentuale Anteil der Landwirtschaft an den verbleibenden N<sub>2</sub>O-Emissionen zu. Zählt man noch die durch die Landwirtschaft verursachten Emissionen aus dem Gewässerbereich hinzu, ergibt sich in einem Referenzszenario, daß die Landwirtschaft im Jahr 2020 für mehr als die Hälfte der N<sub>2</sub>O-Emissionen verantwortlich sein wird (siehe hierzu die quantitativen Abschätzungen für das *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario*).

Da die Möglichkeiten der Emissionsreduktion bei der Adipinsäureproduktion bereits im Referenzszenario weitgehend ausgeschöpft werden, zudem die übrigen Bereiche von ihrer Bedeutung her weniger wichtig sind, konzentrieren sich die Überlegungen zu weiteren Emissionsreduktionen auf den Landwirtschaftsbereich.

### 2.2.2.1 Weitergehende Verminderung des Stickstoffdüngereinsatzes in der Landwirtschaft

Zur weiteren Reduktion der Emissionen aus der Landwirtschaft ist es erforderlich, die Zufuhr an Stickstoffdünger über das im Referenzfall (*Mit-Beschlossenen Maßnahmen-Szenario*) abgebildete Ausmaß hinaus zu reduzieren. Bei der Aufbringung von Stickstoffdünger sind die beiden großen Gruppen Wirtschaftsdünger und mineralischer Stickstoffdünger zu unterscheiden. Der Wirtschaftsdünger fällt vorwiegend im Bereich der Viehwirtschaft an. Die aufzubringenden Mengen werden daher durch den Viehbestand determiniert. Da es sinnvoll ist, den als Abfallprodukt der Viehwirtschaft anfallenden Wirtschaftsdünger wieder in den Stickstoffkreislauf

zurückzuführen, liegt das Hauptaugenmerk einer reduzierten Stickstoffzufuhr bei einer Verminderung des mineralischen Düngereinsatzes.

Eine Reduktion des Stickstoffdüngereinsatzes steht im Zielkonflikt zwischen Umweltschutz einerseits und den Ertragserwartungen der Landwirtschaft andererseits. Um diesen Zielkonflikt möglichst zu minimieren, sollte die Zielsetzung darin liegen, die vorhandenen Stickstoffüberschüsse, die nicht von den Pflanzen aufgenommen werden, möglichst zu reduzieren. Hierzu ist eine bedarfsgerechte Düngung, wie sie auch die Düngeverordnung anstrebt, verstärkt voranzutreiben. In diesem Bereich dürfte es noch erhebliche Spielräume geben: So lag der durchschnittliche Stickstoffüberschuß Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre sowohl in den alten als auch den neuen Bundesländern bei ungefähr 100 kg/ha (Weingarten et al. 1995). Diese dürften auch nach der Umsetzung der Düngeverordnung bei weitem noch nicht abgebaut sein. Der SRU kommt in seinem Sondergutachten "Konzepte einer dauerhaft-umweltgerechten Nutzung ländlicher Räume" (1996) zur Schlußfolgerung, daß die Düngeverordnung nicht ausreichen dürfte, um das politisch angestrebte Ziel einer Halbierung der Nährstoffeinträge - die hauptsächlich aus den Stickstoffüberschüssen der Landwirtschaft stammen - zu erreichen.

Zu einer weitergehenden Reduktion der Stickstoffdüngermengen stehen vor allem zwei Ansatzpunkte zur Verfügung:

- Maßnahmenbündel zur verbesserten Umsetzung der Düngeverordnung im Bereich der bedarfsgerechten Düngung sowie
- Einbezug des mineralischen Düngers mit flächenbezogenen Höchstaubringungsmengen in die Düngeverordnung und/oder Erhebung einer Abgabe auf mineralischen Stickstoffdünger.

Für eine weitergehende Umsetzung einer bedarfsgerechten Düngung dürften insbesondere Informationen und Hilfestellungen erforderlich sein, um die in § 4 der Düngeverordnung genannten Anforderungen verstärkt umzusetzen. Ein derartiges Maßnahmenpaket müßte an einer Analyse der Hemmnisse einer bedarfsgerechten Düngung ansetzen und zielgruppenspezifische Informations- und Beratungsprogramme konzipieren und umsetzen. Eine bedarfsgerechtere Düngung würde dazu führen, daß bei gleichem landwirtschaftlichen Output weniger Dünger eingesetzt werden muß. Bei einem näherungsweise konstanten Anfall von Wirtschaftsdünger würde dies dann dazu führen, daß mineralischer Dünger durch Wirtschaftsdünger substituiert werden kann. Bei konventioneller und intensiver Landwirtschaft wäre dabei wegen langsamer N-Freisetzung aus Wirtschaftsdünger die Randbedingung eines Mindestanteils von etwa 40 % aus mineralischem Dünger einzuhalten. Flankierend sollten die Einsatzmöglichkeiten des Wirtschaftsdüngers - z. B. durch Vorbehandlung zur besseren Aufschließbarkeit der Nährstoffe mittels Gülleaufbereitungsverfahren - erweitert werden.

Die vom SRU (1996) befürworteten Alternativen einer Ausweitung der Düngeverordnung bzw. einer Erhebung einer Abgabe auf Mineraldünger sind vor dem Hintergrund zu sehen, daß die in § 3 der Düngeverordnung formulierten flächenbezogenen Begrenzungen nur für Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft gelten, nicht aber für Mineraldünger. Die Ausweitung der Düngeverordnung oder die Einführung einer Stickstoffabgabe auf mineralischen Dünger würde einen weiteren Anreiz zur sparsamen Verwendung von Dünger bewirken. Neuere Untersuchungen zur Preiselastizität der Düngemittelnachfrage deuten darauf hin, daß eine derartige Abgabe durchaus erhebliche Mengeneffekte mit sich bringen könnte. So wird selbst unter ungünstigen Bedingungen eine Preiselastizität von -0,28 errechnet (Strotmann 1992), andere Arbeiten kommen zu noch höheren Werten (vgl. DVWK 1995). Bei der Ausgestaltung einer derartigen Abgabe wäre es denkbar, das Aufkommen wieder an die Landwirte zurückzuschleusen, um Einkommensrückgänge zu kompensieren, oder es (teilweise) zur Finanzierung eines Maßnahmenbündels zum Hemmnisabbau einer effizienten Düngernutzung einzusetzen.

Auch wenn diese Maßnahmen weniger technischer Natur sind und daher keine technologischen Entwicklungen benötigen, ist für ihre Implementierung zu bedenken, daß ein Maßnahmenbündel zum Abbau der Hemmnisse einer effizienten Düngung einer sorgfältigen Konzeption bedarf. Erfahrungen aus dem Energiebereich legen es darüber hinaus nahe, daß derartige Programme im Zeitablauf noch optimiert werden müssen, um ihre volle Wirksamkeit zu erreichen. Ähnliches gilt für die Wirkungen einer Stickstoffabgabe: Im allgemeinen liegen die langfristigen Preiselastizitäten über den kurzfristigen, da kurzfristig v. a. das Verhalten, mit längeren Anpassungsfristen zusätzlich auch der Kapitalbestand an die veränderten Preisrelationen angepaßt werden können. Aufgrund dieser Überlegungen ist davon auszugehen, daß die Wirkungen dieser Maßnahmen erst nach und nach zum Tragen kommen, so daß bis zum Jahr 2005 nur geringe Reduktionen gegenüber dem Referenzszenario zu erwarten sind.

Die erreichbaren Emissionsreduktionen hängen von der Intensität und Eingriffstiefe der Maßnahmen ab. Für das "PolitikszENARIO" (*Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario*) wurde eine Eingriffstiefe unterstellt, die den Produktionserwartungen der Landwirte in gewissem Umfang Rechnung trägt (siehe Abschnitt "Szenarien"). Bei einem vollständigen Verzicht auf Mineraldünger, wie er z. B. dem Leitbild ökologischer Landbau entspricht, wären noch weitergehende Minderungen der N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der Landwirtschaft und den Gewässern denkbar.

Darüber hinaus könnte eine Reduktion des Fleischverbrauchs und der Exporte angestrebt werden. Hierdurch käme es zu entsprechenden Reduktionen des Viehbestandes und damit sowohl zu Verminderungen der Anbaufläche von Futtermitteln als auch des Anfalls von Wirtschaftsdünger, der auf die landwirtschaftlichen Flächen verbracht wird. Es wird beispielsweise geschätzt, daß ein Abbau der Tierbestände durch Abbau der Agrarexporte sowie bedarfsorientierte und ausgewogene Eiweiß-

versorgung der Bevölkerung eine potentielle N-Entlastung von über 1,3 Mio. t/a bzw. jährlich 76 kg/ha, bezogen auf den Zustand von 1991, mit sich brächte (Isermann, 1994).

## 2.2.3 Maßnahmen betreffend NMVOC

### 2.2.3.1 Lackierung

#### Vorbemerkungen

Das Scheitern einer freiwilligen Vereinbarung hat gezeigt, daß in Umsetzungskonzepten nicht nur die Farben- und Lackhersteller, sondern vor allem die *Anwender* einbezogen werden müssen. Problematisch ist dabei, daß in der Mehrzahl der Fälle die Oberflächenbeschichtung nicht das Kerngeschäft desjenigen ist, der den Vorgang durchführt. Gerade in den Bereichen, in denen Farb- und Lacksysteme mit hohen Lösemittelanteilen angewandt werden, steht die Herstellung eines Produktes im Vordergrund und die Beschichtung der Produktoberfläche ist nur einer der Produktionsvorgänge, der quasi "nebenbei" durchgeführt werden muß. Eine Ausnahme bilden lediglich Lohnbeschichter und die Handwerker.

Wie im Anhang dargestellt, ist der Einsatz nachgeschalteter Emissionsminderungseinrichtungen in vielen Fällen relativ aufwendig. Der Anwendungsbereich für Farben und Lacke ist daher ein Sektor, auf den die Notwendigkeit eines integrierten Umweltschutzansatzes tatsächlich zutrifft. Die bestehenden Probleme zeigen, daß die Umsetzung eines derartigen Ansatzes ebenso wie der nachgeschaltete Umweltschutz deutlicher Vorgaben bedarf. Ansonsten ist nicht zu erwarten, daß die Emittenten auf den Einsatz anderer Produkte umstellen, wenn dies nur Verbesserungen beim Arbeits- und Umweltschutz bringt, hingegen zusätzlicher Investitionen bedarf und ggf. sogar Abstriche bei der Produktqualität verlangt.

#### Ökonomische Instrumente

Im Bereich der Oberflächenbeschichtung existiert bezüglich der Quellstärke der Emittenten eine erhebliche Spanne. Vergleichsweise wenigen großen Lackieranlagen mit möglichen hohen Quellstärken steht eine Vielzahl von kleinen Lackieranlagen, Hand- und Heimwerkern gegenüber, die in der Summe ähnliche Emissionen verursachen können.

Vor diesem Hintergrund kommt dem Einsatz von produktbezogenen Maßnahmen besondere Bedeutung zu. Der Einsatz von ökonomischen Instrumenten ist eine Variante derartiger Maßnahmen.

Ein neues Instrument wäre die Einführung einer Steuer oder die Erhebung einer *Abgabe auf Lösemittel oder lösemittelhaltige Beschichtungsstoffe*. Das Erheben einer Steuer oder Abgabe auf Lösemittel kann daran scheitern, daß der Begriff des Lösemittels schwer zu definieren ist. Es erscheint sinnvoller, bestimmte Produkte mit einer Steuer oder Abgabe zu belegen und hierbei die Masse an emittiertem organischem Kohlenstoff bei der Aushärtung des Produktes als Maßstab zu wählen. Hierbei muß statt dem Lösemittelgehalt bei der Vermarktung der Lösemittelgehalt, der für die konzipierte Verarbeitung benötigt wird, zur Grundlage gemacht werden, um den Zusatz von Verdünner vor der Applikation mit einzubeziehen (Schärer 1996).

Zur Tarifierung sollte der Investitionsaufwand, die Änderung bei den Betriebskosten und die ggf. eintretende Minderung des Produktwertes herangezogen werden. Hierbei wären Werte von ca. 1 bis 5 DM pro kg org. C zu erwarten, wie sie zur Umsetzung der Schweizer Lösemittelabgabe vorgesehen sind (Schärer 1996). Ähnlich wie in der Schweiz könnte die Abgabe zur Kompensation der Kosten von Gesundheitsschäden, die durch die emittierten Lösemittel innerhalb und außerhalb der Anwendungsbetriebe entstehen und durch Folgeprodukte (Ozon) entstehen, eingesetzt werden. Denkbar wäre, wie bei anderen Abgaben, auch die Rückgabe des Aufkommens z.B. in Form von Finanzierungshilfen (Zuschuß oder Kredite) für die Umrüstung von Lackieranlagen.

In einigen Bundesländern ist die Anwendung von Farben und Lacken bereits indirekt mit einer Abgabe belegt, da eine *Sonderabfallabgabe* auf ordnungsgemäß als Abfall entsorgte Farb- und Lackschlämme erhoben wird. Obwohl sich eine derartige Abgabe aus dem Gesichtspunkt der Förderung einer Reduzierung der anfallenden Sonderabfallmassen als effizient und wirksam erwiesen hat (Dopfer 1994), wird in einigen Bundesländern über eine Abschaffung derartiger Abgaben diskutiert.

### Ordnungsrechtliche Instrumente

Die Neufassung der *TA-Luft 1986* hatte für die Mehrzahl der Farb- und Lackanwender - im Gegensatz zu anderen Branchen - keine direkten Auswirkungen. Von der Anwendung der *TA-Luft 86* sind ca. 99 % der Lackierbetriebe mit ca. 80 % der lackbedingten Lösemittlemissionen verschont geblieben (May 1995). Bedeutung erlangte lediglich die Dynamisierungsklausel in Ziffer 3.3.5.1.1 Absatz 2 *TA-Luft*, über die die Emission aus KFZ-Lackieranlagen auf 35 g Lösemittel pro m<sup>2</sup> Werkstück für Neuanlagen reduziert wurde. Sollte die Einsetzbarkeit von lösemittelarmen Systemen auch für den Clear-Coat, ggf. durch die neue Lackierungsstraße von Audi, bewiesen werden, so könnte sich dieser Wert auf 20 g pro m<sup>2</sup> senken. Die Lösemittlemission aus der Lackierung eines PKW würde dann auf ca. 1 bis 2 kg sinken.

Ordnungsrechtlich wäre es daher der naheliegendste Weg,

- a) die Genehmigungsschwelle für Lackieranlagen in der 4. BImSchV deutlich zu senken und
- b) die TA-Luft auch auf diese Anlagen tatsächlich anzuwenden.

Die Erfahrung zeigt jedoch, daß eine Änderung der TA Luft nur schwer durchzusetzen scheint. Insofern kommt der Frage anderer Instrumente eine hohe Bedeutung zu.

Auf der europäischen Ebene kämen als Instrumente die *Richtlinie zur integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung* (IPPC) und die *Lösemittel-Richtlinie* in Betracht.

In bezug auf die IPPC-Richtlinie stellt die Europäische Kommission jedoch fest, daß 50 bis 70 % der VOC Emissionen in der EU aus kleineren Anlagen freigesetzt werden, die, gemäß der als Gemeinsamer Standpunkt des Rates beschlossenen Fassung, nicht von der Richtlinie erfaßt werden (EU 1996). Sofern der Rat nicht in der letzten Lesung Änderungen vornimmt, wird daher die IPPC-Richtlinie keinen Beitrag zur Minderung der Lösemittlemissionen aus Lackieranlagen liefern.

Die Arbeiten der Europäischen Kommission an einer Lösemittelrichtlinie wurden im Sommer 1994 weitgehend eingestellt (Große-Ophoff 1996). Auch von dieser Seite ist daher mit einem Instrument zur Minderung der VOC-Emissionen nicht zu rechnen.

Insofern verbleibt die Möglichkeit, einen Weg zu beschreiten, der in den USA (Kalifornien) und in Österreich verfolgt wird. Dieser besteht aus der Kombination einer *nationalen Lösemittelverordnung* mit einer *Lackieranlagenverordnung*. Hindernisse durch das EU-Recht sind dabei nicht zu erwarten (Aichinger 1996).

Die Lösemittelverordnung stützt sich in Österreich auf das Chemikaliengesetz und reguliert zulässige Art und Konzentration von Lösemitteln in Farben und Lacken. Für bestimmte Materialien und Anwendungsbereiche wird ein höchstzulässiger Gehalt an Lösemitteln vorgeschrieben. In Österreich sind dies 10 bis 15 Gew.-%, wobei Ausnahmen zugelassen wurden.

Die Lackieranlagenverordnung begrenzt die Emissionen der Lackieranlagen, wobei dies in der BRD auch die *nicht* nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigungsbedürftigen Anlagen betreffen würde. Hier wird - wie in Österreich - geplant, Emissionsgrenzwerte für Lackieranlagen ab einem Verbrauch von 2 Mg/a an Lacken, die mehr als 15 Gew.-% Lösemittel enthalten, vorzuschreiben (Große-Ophoff 1996).

In Österreich gelten seit 1.1.1996 für entsprechende Lackieranlagen folgende Grenzwerte:

Tabelle 7: Emissionsgrenzwerte für Lackieranlagen gemäß österreichischer Lösemittelverordnung

Neuanlagen					
Lösemittelverbr.	< 2.000 kg/a	> 2.000 kg/a			
		< 10 kg/h		> 10 kg/h	
Staub	3 mg/m <sup>3</sup>	3 mg/m <sup>3</sup>		3 mg/m <sup>3</sup>	
		Nachverbrennung	sonstige Abluftreinigung	Nachverbrennung	sonstige Abluftreinigung
C <sub>ges</sub> (TOC)	100 mg/m <sup>3</sup>	30 mg/m <sup>3</sup>	75 mg/m <sup>3</sup>	20 mg/m <sup>3</sup>	20 mg/m <sup>3</sup>
CO	-	100 mg/m <sup>3</sup>	-	100 mg/m <sup>3</sup>	-
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	-	100 mg/m <sup>3</sup>	-	100 mg/m <sup>3</sup>	-
		150 mg/m <sup>3</sup>	-	150 mg/m <sup>3</sup>	-
Abscheidegrad	-	> 80%	> 60%	> 80%	> 60%
Altanlagen					
ab 1.1.1999 bei einem Lösemittelverbrauch von > 5.000 kg/a					
ab 1.1.2001 bei einem Lösemittelverbrauch von < 5.000 kg/a oder bei einer Lösemittlemissionsverringerung zwischen 1991 und 1996 um mindestens 80%					
Lösemittelverbr.	< 2.000 kg/a	> 2.000 kg/a			
Staub	5 mg/m <sup>3</sup>	5 mg/m <sup>3</sup>			
		Nachverbrennung		sonstige Abluftreinigung	
C <sub>ges</sub> (TOC)	150 mg/m <sup>3</sup>	30 mg/m <sup>3</sup>		75 mg/m <sup>3</sup>	
CO	-	100 mg/m <sup>3</sup>		-	
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	-	100 mg/m <sup>3</sup>		-	
		150 mg/m <sup>3</sup>		-	
Abscheidegrad	-	> 80%		> 60%	
Anmerkungen:					
1. Jeweils ohne Ethanol und Propanol und ohne Lösemittel aus lösemittelarmen Beschichtungsprodukten					
2. Jeweils 150 mg/m <sup>3</sup> bei Einsatz von stickstoffhaltigen Lösemitteln					

Da sich freiwillige Vereinbarungen als nicht wirksam erwiesen haben (Große-Ophoff 1996), führt in Deutschland kein Weg an entsprechenden Verordnungen vorbei, wenn die internationale Verpflichtung zur 30 %igen VOC-Reduktion (zwischen 1988 und 1999) eingehalten werden soll.

### Eigenes Handeln

Für den Bund und die Länder bestehen im Bereich der Minderung der VOC-Emissionen aus Oberflächenbeschichtungsvorgängen zahlreiche Möglichkeiten zum eigenen Handeln.



Grundsätzlich sollten entsprechende Produkte nur noch *beschafft* werden, wenn sie unter Einhaltung der Anforderungen einer Lackieranlagen- und Lösemittelverordnung hergestellt wurden.

Für den Bereich der Anschaffung von Fahrzeugen läßt sich die eindeutige Vorgabe ableiten, daß nur noch Fahrzeuge angeschafft werden sollten, bei deren Lackierung ein Wert von 20 g Lösemittel pro m<sup>2</sup> Oberfläche eingehalten wurde.

### **Quantifizierung der Maßnahmen**

Da sich alle referierten Maßnahmen noch in der Diskussion befinden und ein eindeutiges Design der Instrumente sich nicht abzeichnet, kann im Rahmen dieses Projektes keine Quantifizierung vorgenommen werden.

#### **2.2.3.2 Verteilung von Ottokraftstoffen**

##### **Vorbemerkungen**

Die VOC-Emissionen bei der Verteilung von Ottokraftstoffen sind den verbrauchten Kraftstoffmengen fast proportional. Von daher kommt den Maßnahmen zur Reduktion des Verbrauchs dieser Kraftstoffe zentrale Bedeutung zu. An dieser Stelle sollen derartige Maßnahmen jedoch nicht analysiert werden.

##### **Ordnungsrechtliche Instrumente**

Ordnungsrechtliche Instrumente bestehen in Gestalt der 21. und 22. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz bereits.

Die Trendabschätzungen zeigen, daß jedoch noch weiter Optimierungen möglich sind, die auch über das Ordnungsrecht umgesetzt werden könnten.

Zum einen betrifft dies die technische Optimierung der Be- und Entladeprozesse. Nach CORINAIR (1996) kann durch die Befüllung von Tanks und Behältnissen von unten eine deutliche Reduktion der Rohgase erzielt werden, die sich entsprechend auf die Konzentration der Emissionen nach Behandlung auswirkt. Zusätzliche Reduktionen sind durch den Verzicht auf Ballastwasser in der Binnenschifffahrt, weitere Begrenzung der diffusen Emissionen und der unfallbedingten Freisetzungen möglich.

Entscheidend ist jedoch die Frage, durch welche Maßnahmen die Emissionsminderung bei der Betankung der Fahrzeuge (nach CORINAIR (1996) Wirkungsgrade von 50 bis 60 %) noch weiter verbessert werden können. Hier sollte versucht wer-

den, durch Optimierung der Fahrzeuge den für einen Aktivkohleabsorber angesetzten Wert von 95 % zu erreichen, da sich nur durch eine solche Maßnahme nochmals eine deutliche Reduktion ergibt.

### **Eigenes Handeln**

Bund und Länder sind sowohl bedeutende Fahrzeughalter, als auch Vertreiber von Ottokraftstoffen. Ihnen kommt als Vorbild eine bedeutende Funktion zu.

Entsprechend den obenstehenden Ergebnissen der Trendabschätzung sollten Bund und Länder nur noch Fahrzeuge mit Ottomotor erwerben, bei denen eine optimale Emissionminderung zumindest bei der Betankung gewährleistet ist. Treffen die Daten von CORINAIR (1996) zu und läßt sich keine andere Technik mit gleicher Wirksamkeit realisieren, so dürfen dies nur noch Fahrzeuge mit eingebautem Aktivkohleabsorber sein.

Im Vollzug der 20. und 21. BImSchV bei Tankstellen im Besitz von Bund, Ländern und Kommunen sollte versucht werden, nicht nur die Emissionminderungseinrichtungen verordnungsgemäß zu realisieren, sondern auch die Be- und Entladungs-techniken optimal zu gestalten. Die entsprechenden Tanklager und Verteilungseinrichtungen sollten zur Erprobung der Wirksamkeit weitergehenden Maßnahmen (z.B. Membranabscheider an Atmungsventilen von Tanks, Isolation von Tanks etc.) genutzt werden.

Spezielle Bedeutung kommt der Weiternutzung des von der NATO betriebenen Fernleitungsnetzes zu. Soweit Leitungen dieses weit verzweigten Fernleitungsnetzes an den Stand der Technik angepaßt werden können, sollten sie auch zu zivilen Zwecken genutzt werden. Zwar ist dies primär unter dem Aspekt der Verbesserung der Verkehrssicherheit durch eine Reduktion der Gefahrguttransporte zu sehen, jedoch ergibt sich daraus auch eine Reduktion der Be- und Entladevorgänge, wodurch sich eine Emissionsminderung auch bei Ottokraftstoffen einstellen kann.

### **Quantifizierung der Maßnahmen**

Da sich alle referierten Maßnahmen noch in der Diskussion befinden und ein eindeutiges Design der Instrumente sich nicht abzeichnet, soll im Rahmen dieses Projektes nur eine grobe Abschätzung für eine Lösemittelverordnung nach dem Muster Österreichs vorgenommen werden. Bis zum Jahr 2005 kann dabei eine Umsetzung von einem Drittel des Potentials und bis zum Jahre 2020 von weiteren zwei Dritteln des Potentials angesetzt werden.

Die quantifizierbaren Wirkungen einer solchen Verordnung für Deutschland belaufen sich daher auf ca. 165.000 Mg NMVOC (2005) bzw. 490.000 Mg (2020).

## 2.2.4 Maßnahmen betreffend nichtenergiebedingtes CO<sub>2</sub>

### 2.2.4.1 Zementherstellung

#### Vorbemerkungen

Schmidt (1992b) gibt an, daß ca. 1/3 des in Deutschland hergestellten Zementes durch Zemente mit Zumahlstoffen ersetzt werden kann. So kann angenommen werden, daß bis zum Jahre 2005 ein Drittel des Portlandzementes bzw. des Portlandzementklinkers für die neuen Bundesländer durch Hüttenzement CEM III/B ersetzt werden könnte.

Bei einer Produktion entsprechend der obenstehenden Daten und Abdeckung eines Drittel des Marktes für Portlandzement durch Hüttenzement CEM III/B ergäben erhebliche Minderungen für die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

#### Ökonomische Instrumente

Von Seiten der Zementhersteller wird ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe und dem Einsatz von anderen Zementen als Portlandzementen gesehen (Schmidt 1992b). Die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Abgabe könnte den Absatz der Zemente mit niedrigeren Emissionsfaktoren als Portlandzemente fördern.

Die Einführung einer *Deponieabgabe* könnte dazu führen, daß bei der Herstellung von Hochofenschlacke verstärkt darauf geachtet wird, daß diese verwertbar ist. Ebenfalls könnte der Umfang der Rückführung von Abbruchbeton verbessert werden.

#### Ordnungsrechtliche Instrumente

Zementwerke sind nach dem *Bundes-Immissionsschutzgesetz* genehmigungsbedürftige Anlagen. Eine Emission ist jede Veränderung der natürlichen Zusammensetzung der Luft, also auch eine Abgabe von CO<sub>2</sub>. Gleichwohl beinhalten die Genehmigungen für Zementwerke keinen CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwert.

Damit stellt sich die Frage, ob ein entsprechender CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwert nach dem Stand der Technik nicht im Rahmen der anstehenden Novellierung der ersten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz aufgenommen werden könnte.

## **Eigenes Handeln**

Im Rahmen von *Baufträgen des Bundes und der Länder*, sowie den von diesen *bezuschußten Bauvorhaben*, dürfte jährlich eine nicht unerhebliche Masse an Zement verbraucht werden. Durch Ausarbeitung und Anwendung entsprechender technischer Baurichtlinien für die Auftragsvergabe oder Bedingungen an Zuschüsse, könnte wesentliche Impulse für die Verbreiterung des Einsatzes von Zementen mit günstigen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren gegeben werden.

## **Quantifizierung der Maßnahmen**

Da für keine der aufgeführten Maßnahmen ein konkretes Design vorliegt bzw. diskutiert wird, kann im Rahmen dieses Projektes keine detaillierte Quantifizierung vorgenommen werden. Die durch Substitution von Zementsorten grundsätzlich erzielbaren Emissionsminderungen können so nur über grobe Modellrechnungen zum Substitutionsumfang ermittelt werden. Unter den o.g. Annahmen zum möglichen Substitutionsumfang ergibt sich gegenüber dem *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von ca. 3,2 Mio. t.

### **2.2.4.2 Aluminiumproduktion**

## **Ordnungsrechtliche Instrumente**

Durch ordnungsrechtliche Instrumente könnte der Einsatz von Aluminium in denjenigen Bereichen, in denen andere Materialien verfügbar sind und ggf. bessere ökologische Eigenschaften haben (z.B. Fensterrahmen) oder Aluminium nicht zu Aluminiumprodukten recycelt werden kann (z.B. bestimmte Verpackungen), untersagt werden.

## **Eigenes Handeln**

Durch entsprechende Fassung von Vergabe- und Förderungsrichtlinien kann der Einsatz von Aluminium in Bereichen, in denen Ersatzmaterialien verfügbar sind, reduziert werden. Zu denken ist hierbei vor allem an den Baubereich und ggf. an Verpackungen.

## **Quantifizierung der Maßnahmen**

Da für keine der aufgeführten Maßnahmen ein konkretes Design vorliegt bzw. diskutiert wird, kann im Rahmen dieses Projektes keine Quantifizierung vorgenommen werden.

### 2.2.4.3 Ammoniakherstellung

#### Vorbemerkungen

Auch wenn keine Trendrechnung für die Emissionen mit Reduktionsmaßnahmen entwickelt werden kann, so können einige Instrumente angegeben werden, mit denen eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Bereich der Herstellung von Ammoniak zu erzielen sind.

#### Ökonomische Instrumente

Zur Reduktion der Kohlendioxidemissionen bei der Herstellung von Ammoniak stehen verschiedene Möglichkeiten des Einsatzes von ökonomischen Instrumenten zur Verfügung.

Am naheliegendsten ist die Erhebung einer *Abgabe auf die Vermarktung oder Verwendung stickstoffhaltiger Düngemittel* (z. B. 0,10 DM pro kg N). Der Erlös der Abgabe könnte z. B. zur Förderung von Gewässer- oder Bodensanierungsmaßnahmen, zur Förderung des Einsatzes natürlicher Düngemittel eingesetzt werden. (Vgl. auch die Aussagen des FhG-ISI zur Erhebung einer Abgabe auf mineralischen Stickstoffdünger in Abschnitt 2.2.2.1 dieses Berichts.)

Das schon derzeit eingesetzte Spektrum der Instrumente könnte zur Regulierung des landwirtschaftlichen Marktes im Hinblick auf eine Reduzierung des Einsatzes von stickstoffhaltigen Düngemitteln optimiert werden. Zu denken ist hierbei vor allem an eine *Intensivierung der Flächenstillegungs- und Extensivierungsmaßnahmen* der Europäischen Union.

#### Ordnungsrechtliche Instrumente

Der Einsatz eines ordnungsrechtlichen Verbotes - in Form eines Herstellungs-, Vermarktungs- und Anwendungsverbotes für Ammoniak und daraus hergestellter Stoffe - auf der Grundlage des Chemiekaliengesetzes kommt kaum in Betracht.

Zu prüfen ist aber die Möglichkeit einer weiteren *Ausweisung von Schutzgebieten* nach Wasser- und Naturschutzrecht, die neben einer Entlastung des Bodens und der Gewässer von Stickstoffeinträgen zu einer Verringerung der Herstellung von stickstoffhaltigen Düngemitteln führen können.

## Eigenes Handeln

Die Bundes- und Landesregierungen sind nicht unwesentliche Kunden für Nahrungsmittel und andere landwirtschaftliche Produkte. Nicht nur aus Gründen der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Ammoniak wäre zu prüfen, ob bei den entsprechenden *Ankäufen* nicht stärker auf ökologische Kriterien zurückgegriffen werden könnte. Bei Einführung dieser Praxis als Regelfall würden sicher entscheidende Impulse für die Landwirtschaft ausgelöst.

## Quantifizierung der Maßnahmen

Da für keine der aufgeführten Maßnahmen ein konkretes Design vorliegt bzw. diskutiert wird, kann im Rahmen dieses Projektes keine Quantifizierung vorgenommen werden.

### 2.2.4.4 Glasproduktion

## Ökonomische Instrumente

Der Einsatz ökonomischer Instrumente wurde bislang im wesentlichen in bezug auf den Anteil von Einweggebinden bei Getränkeverpackungen diskutiert. Auch wenn diese Frage bislang mehr aus abfallpolitischer Sichtweise erörtert wurde (Verknappung des Deponieraums), sprechen auch die möglichen Wirkungen bzgl. einer Reduktion der nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die umfassende Einführung eines derartigen Instrumentes.

Denkbar ist aber auch eine Ausweitung der *Abgabe auf Einweggebinde* außerhalb des Bereichs der Getränkeverpackungen. So könnten z.B. Haushaltschemikalien- und Laborchemikalienflaschen ebenfalls in eine entsprechende Abgabenregelung einbezogen werden.

## Ordnungsrechtliche Instrumente

Eine Verbesserung der Wiederverwendung von Glas kann durch die Verbesserung der *Verpackungsverordnung* und den Erlass weiterer Verordnungen (z.B. der *Altauto-Verordnung*) bewirkt werden. Eine Emissionsminderung ist aber nur dann zu erreichen, wenn ein Ziel für die Wiederverwendung des zurückgewonnenen Altglases vorgegeben wird und nicht die Wahl zwischen Wiederverwendung und Weiterverwendung offen bleibt.

Besondere Beachtung wäre hier dem *Baubereich* zu schenken, damit nicht nur die propagierte Erfassung von Fensterrahmenmaterialien erfolgt, sondern gleichzeitig

auch eine Erfassung des anfallenden Glases, die eine Wiederverwendung in der Flachglasindustrie erlaubt. Hierbei ist der sich verstärkende Trend zur Fassadenverglasung zu berücksichtigen.

### **Eigenes Handeln**

In der Bundesrepublik sind verschiedene Anlagen zum Recycling von Flachglas in Betrieb. Entsprechend dem Produktspektrum dieser Anlagen könnten Anforderungen in den technischen Wohnungsbaurichtlinien definiert werden, die dafür sorgen, daß die Produkte dieser Recyclingbetriebe im *öffentlich geförderten Bau* bevorzugt verwendet werden.

### **Quantifizierung der Maßnahmen**

Zur Bewertung eines Maßnahmenpaketes, mit dem wesentlich bessere Recyclingquoten erzielt werden können, wird hier eine Modellrechnung gezeigt.

Für den Flachglasbereich wird zum einen unterstellt, daß der KFZ-Glas-Anteil 15 % beträgt und von diesem 30 %, gemäß des Entwurfes zur Altauto-Verordnung, wieder eingesetzt wird. Zum anderen wird unterstellt, daß 60 % des Flachglases aus dem Bausektor wegen des Recyclings von PVC- und Aluminiumfenstern ebenfalls zurückgewonnen und hiervon 75 % wieder eingesetzt wird.

Für den Bereich des Behälterglases wird angenommen, daß sich die Recyclinganteile bei braunem Glas auf 80 % und bei weißem Glas auf 70 % steigern lassen.

Im Bereich der Glaskolben und Glasröhren wird unterstellt, daß sich durch eine Verbesserung des Recyclings von Bildröhren insgesamt 25 % wieder einschmelzen lassen.

Unter Ansatz dieser Vorgaben und den spezifischen Anteilen am Glasaufkommen (siehe folgende Tabelle) kann die spezifische CO<sub>2</sub>-Emission mit 80 kg CO<sub>2</sub> je Tonne Glas ermittelt werden.

Bezogen auf das *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* ergibt sich ein Minde-rungspotential von ca. 400.000 t CO<sub>2</sub>.

Tabelle 8: Ausgangswerte für die Bestimmung der Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Recyclingquote für Glas im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario*

Produktion		Recyclingquote
Flachglas	17%	43%
veredeltes Flachglas	11%	43%
Hohlglas	68%	
grüne Flaschen	17%	95%
braune Flaschen	11%	80%
weiße Flaschen	20%	70%
Konservengläser	9%	70%
Glaskolben	2%	25%
Glasröhren	1%	25%
Rest	8%	
Glasfasern mindestens	4%	
Summe	100%	
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts		

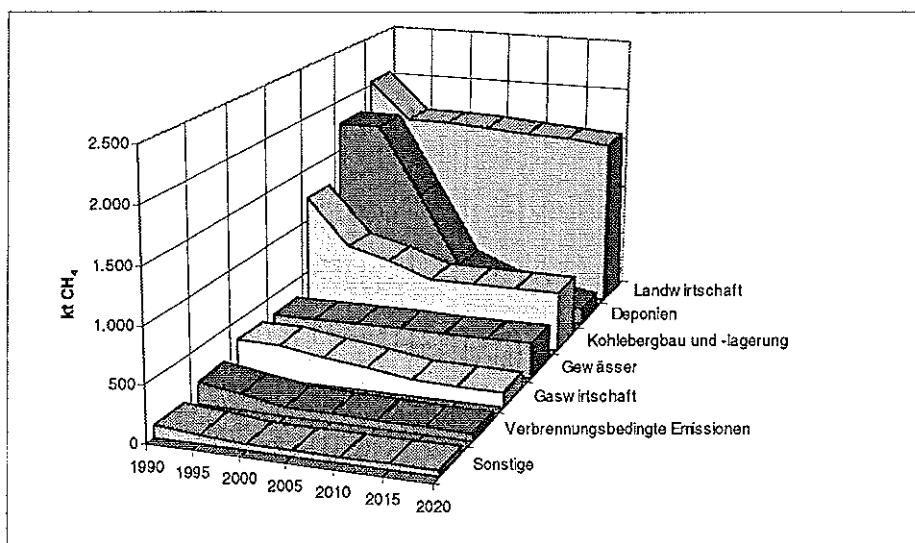


### 3 Szenarien zur Entwicklung der Emissionen von CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC und nichtenergiebedingtem CO<sub>2</sub>

#### 3.1 CH<sub>4</sub>

Im Referenzfall des *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenarios* dürften die CH<sub>4</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2005 gegenüber dem Stand von 1990 bereits um 45 % und bis 2020 um über 50 % auf gut 2,8 Mio. t zurückgehen (vgl. Tabelle 10). In CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht dies einem Rückgang der jährlichen Treibhausgasemissionen um rund 67 Mio. t bis 2020. Hierzu tragen insbesondere die zu erwartenden Emissionsrückgänge im Bereich der Abfalldeponien und des Steinkohlebergbaus sowie in geringerem absoluten Umfang bei der Erdgasverteilung und in der Güllewirtschaft bei. Die Entwicklung der CH<sub>4</sub>-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* und der Beitrag der einzelnen Emissionsquellen ist in Abbildung 4 veranschaulicht.

Abbildung 4: Entwicklung der CH<sub>4</sub>-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* nach Emissionsquellen

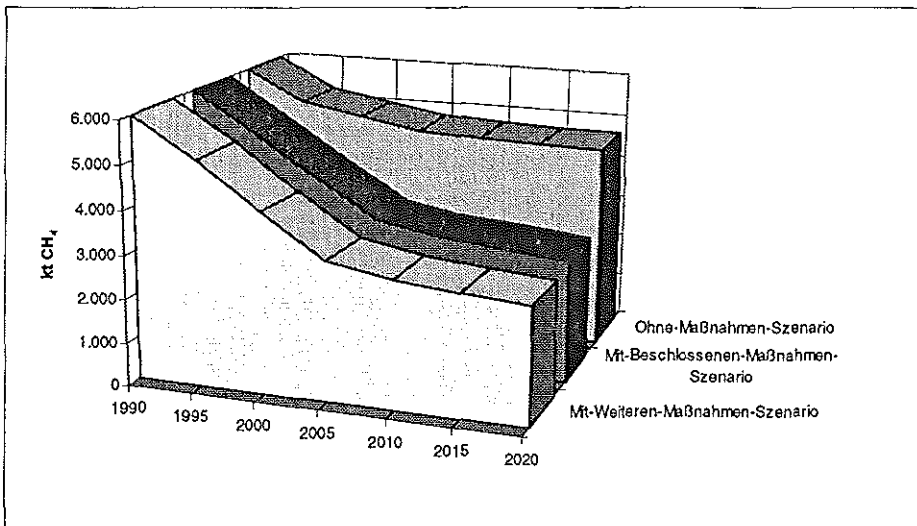


Damit ist bereits ein erheblicher Anteil der bestehenden Emissionsminderungspotentiale ausgeschöpft. D. h., im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* (Tabelle 11) sind nurmehr gut 160 kt/a an zusätzlicher Minderung bis 2020 zu erwarten, was aber dennoch einem nicht zu vernachlässigenden zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Äquivalent von über 3 Mio. t/a entspricht.

Im *Ohne-Maßnahmen-Szenario* (Tabelle 9) wäre hingegen nur ein Emissionsrückgang um gut 20 % bis zum Jahr 2020 zu erwarten, wovon ein großer Teil bereits heute wegen verringerter Viehbestände und zurückgegangener Steinkohlenförderung realisiert wäre.

Die Emissionsentwicklung in den drei betrachteten Szenarien ist Abbildung 5 zu entnehmen.

Abbildung 5: Entwicklung der  $\text{CH}_4$ -Emissionen in den drei betrachteten Szenarien



Die Methan-Emissionen aus Abfalldeponien dürften sich mit der Umsetzung der TA Siedlungsabfall (Maßnahme Nr. 66 des vorliegenden IMA-Maßnahmenkatalogs) bis zum Jahr 2005 auf etwa 460 kt und bis zum Jahr 2020 auf weit weniger als 10 % des Ausgangswertes von knapp 1,8 Mio. t im Jahr 1990 (Umweltbundesamt 1996) verringern. Wie bereits bei der Maßnahmendiskussion (Abschnitt 2.1.2.1) erläutert, ist hierfür die je nach "Deponieklasse" in unterschiedlichem Umfang geforderte Inertisierung des Abfalls (z. B. durch Verbrennung) ausschlaggebend, die eine Methanbildung auf der Deponie in allen Fällen wirksam verhindert. Ferner fordert die TA Siedlungsabfall für bestehende Deponien eine Abdichtung der Deponieoberfläche und Absaugung des methanhaltigen Deponiegases. Die TA Siedlungsabfall beinhaltet Übergangsfristen, und zwar 2005 für die Einhaltung der (Inertisierung-)Anforderungen nach Deponieklassen bzw. 2003 für die Einhaltung der Anforderungen bezüglich Absaugung und Abdeckung. Es ist jedoch davon auszugehen, daß die emissionsmindernden Wirkungen bereits früher einsetzen. Wegen der nicht exakt vorhersehbaren Umsetzungsgeschwindigkeit dieser Maßnahme ist aber die Abschätzung der Emissionsentwicklung, insbesondere mittelfristig bis etwa zum Jahr 2005, mit gewissen Unschärfen verbunden.

Spätestens nach Ablauf der Frist 2005 für die Erfüllung der Inertisierungsanforderungen werden aus heutiger Sicht nur noch bis dahin abgelagerte unbehandelte Abfälle emittieren, so daß für über diesen Zeitpunkt hinausgehende CH<sub>4</sub>-Emissionsprognosen keine Annahmen zur Entwicklung der Abfallmengen erforderlich sind. Zum Effekt der CH<sub>4</sub>-Minderung durch die thermische Abfallbehandlung tritt aber die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung aufgrund der hiermit möglichen Substitution fossiler Energieträger bei der Wärme- und Stromerzeugung. Die Höhe dieses Effektes, der im Rahmen des Teilprojektes nicht quantifiziert wurde, wird hingegen von der eingesetzten Abfallmenge mitbestimmt.

In einem *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* sind keine nennenswerten, weitergehenden Emissionsminderungen im Abfallbereich möglich.

Für das *Ohne-Maßnahmen-Szenario* wurde eine Konstanz der Emissionen auf dem heutigen Niveau unterstellt. Wesentlich für die Quantifizierung dieses Falles wären verlässliche Prognosen der Abfallmengen (in diesem Fall blieben die deponierten Abfälle ja als Emissionsquelle erhalten) ohne die Einflüsse der u. a. dem Klimaschutz dienenden TA Siedlungsabfall oder auch des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Diese ist aber aus heutiger Sicht nicht zu leisten.

Die Methan-Emissionen des **Steinkohlenbergbaus** dürften unter den Annahmen des Referenzszenarios (*Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario*) von gut 1,2 Mio. t im Jahr 1990 (Umweltbundesamt 1996) bis zum Jahr 2005 auf weit weniger als die Hälfte (0,5 Mio. t) zurückgehen und danach - eine konstante Steinkohleproduktion auf niedrigem Niveau unterstellt - konstant bleiben. Für diese Abschätzung wurde gemäß Absprache unter den Projektbeteiligten unterstellt, daß die inländische Förderung bis zum Jahr 2005 auf 35 Mio. t zurückgeht und danach auf diesem (Mindest-)Niveau verharrt. Ferner wurde stark vereinfachend standortunabhängig eine Proportionalität zwischen Kohleförderung und CH<sub>4</sub>-Emission angenommen. Es wurde, wie in der Maßnahmendiskussion (Abschnitt 2.1.2.3) erläutert, von einer spezifischen Emission pro Tonne geförderter Kohle ausgegangen, die dem Stand des Jahres 1993 entspricht, nachdem der deutsche Steinkohlenbergbau seine im Jahr 1990 gemachten Zusagen zur verstärkten Grubengas-Nutzung erfüllt hatte. Der Beitrag des Braunkohlebergbaus ist insgesamt gering.

Im Falle des *Ohne-Maßnahmen-Szenarios* (vgl. Tabelle 9) wurde hingegen rechnerisch eine spezifische Emission pro Tonne geförderter Kohle angenommen, die dem Stand des Jahres 1990 entspricht.

Für das *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* wurde, wie in der Maßnahmendiskussion erläutert, von einer weitergehenden Grubengas-Nutzung ausgegangen. Gegenwärtig beträgt der Anteil der Wetter am gesamten Gasanfall bei der Steinkohlenförderung ca. 60 %, d. h. es werden nur ca. 40 % abgesaugt. Durch die technischen

Maßnahmen zur Intensivierung der Absaugung wird dieser Anteil erhöht. Als plausibler Wert für die Szenariorechnung wurde ein Anteil von 50 % angesetzt.

Gleichzeitig erhöht sich der durchschnittliche Nutzungsgrad des abgesaugten Grubengases; in den Szenariorechnungen wurde von einer Steigerung des durchschnittlichen Nutzungsgrades von knapp 80 % auf 95 % ausgegangen. Damit werden durchschnittliche Werte angesetzt, die gegenwärtig bereits außerhalb des Ruhrgebietes erreicht werden.

Insgesamt kommt es unter diesen Annahmen im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* zu einer Reduktion der CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der Steinkohleförderung um knapp ein Viertel gegenüber dem Referenzfall. Dies entspricht einer zusätzlichen Emissionsminderung der CH<sub>4</sub>-Emissionen um etwa 120 kt/a.

Allerdings ist darauf hinzuweisen, daß diese Szenariowerte nur für eine rechnerisch angenommene inländische Steinkohleförderung von 35 Mio. t/a gelten. Bei einer Reduktion der Steinkohlenförderung verringern sich der Gasanfall und - bei konstantem technischen Verhältnissen - die CH<sub>4</sub>-Emissionen in entsprechendem Ausmaß. Im Referenzfall würde beispielsweise eine Verminderung der Steinkohlenförderung um 1 Mio. t/a. zu einer Emissionsreduktion von rund 15 kt/a CH<sub>4</sub> führen.

Bei der **Erdgasverteilung** ist bereits mittelfristig im Zuge fortschreitender Netzsanierungen in den neuen, aber auch in den alten Bundesländern mit einem deutlichen Rückgang der Emissionen zu rechnen. Da davon auszugehen ist, daß diese Maßnahmen einerseits auch aus Sicherheitsgründen ergriffen werden und andererseits sehr umfassend sind, unterscheiden sich die ausgewiesenen Emissionsentwicklungen in den einzelnen Szenarien nicht<sup>5</sup>.

Die **Viehwirtschaft** trägt mit den stoffwechselbedingten Emissionen der Nutztierhaltung (Fermentation im Pansen von Wiederkäuern) hierzulande derzeit rund 1,2 Mio. t/a (1,4 Mio. t in 1990) zu den CH<sub>4</sub>-Emissionen bei. Unter der Annahme, daß der Viehbestand bei unveränderten Fleisch- und Milchkonsumgewohnheiten nur von der Bevölkerungsentwicklung abhängt und sich damit nur geringfügig ändert (bzw. daß abnehmende Bestandszahlen mit zunehmender Produktivität, sprich: Stoffwechselintensität einhergehen) wird hier nicht von wesentlichen Veränderungen der CH<sub>4</sub>-Emissionen bis 2020 ausgegangen.

Daneben sind der Viehwirtschaft die aufgrund anaeroben Abbaus organischer Substanz bei der **Lagerung tierischer Exkremente** entstehenden Methanmengen von

<sup>5</sup> Die derzeitigen und künftig zu erwartenden Emissionen aus der Erdgasverteilung sind Gegenstand laufender und geplanter Detailuntersuchungen des FhG-ISI. Es ist davon auszugehen, daß die hier ausgewiesenen Zahlenangaben demnächst geringfügig modifiziert werden.

derzeit rund 500 kt/a (ca. 600 kt in 1990) anzulasten. Sie sind grundsätzlich energetisch nutzbar, womit erhebliche Anteile der heutigen Emissionen vermeidbar wären. Durch Biogaserzeugung, vor allem aus flüssigen Abfällen (Gülle), ließe sich als Ergebnis einer Potentialschätzung des FhG-ISI (Schön et al. 1995) rund ein Drittel dieser Emissionen vermeiden. Dabei wurden Aspekte wie Betriebsgrößenverteilung und regionaler Gülleanfall berücksichtigt. Da landwirtschaftliche Biogasanlagen in der Regel bislang ohne erhebliche finanzielle Förderung nicht wirtschaftlich zu betreiben waren, kam diese Technologie mit derzeit rund 200, meist kleineren Anlagen in der Bundesrepublik nicht zum quantitativ bedeutsamen Marktdurchbruch.

In Anbetracht der bislang verfügbaren Fördermöglichkeiten, eines in jüngster Zeit beobachteten - wenn auch nicht quantifizierbaren - günstigen Einflusses des Stromeinspeisungsgesetzes, der Möglichkeit, durch Kofermentation anderer Abfälle (Entsorgungserlöse) die Wirtschaftlichkeit zu steigern, sowie des Zwanges, zu einer aus Boden- und Gewässerschutzgründen erforderlichen Verbesserung der landwirtschaftlichen Praktiken zu gelangen, könnte im betrachteten Zeitraum dennoch ein Teil dieses Potentials - auch unter den Randbedingungen des Referenzfalles - ausgeschöpft werden. Hier wurde für das *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* eine 50 %ige Ausschöpfung des Potentials unterstellt. Dies entspricht einem Emissionsrückgang um knapp 90 kt/a, der bis zum Jahr 2020 gegenüber dem Ausgangswert von 1995 erreicht wird. Die erzeugte Biogasmenge beträgt dann gut 30 PJ/a, die zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden kann und somit zur Schonung fossiler Energieträger und einem zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Bonus von knapp 2 Mio. t/a führt.

Im theoretischen Fall des *Ohne-Maßnahmen-Szenarios* wurde keine zusätzliche Biogaserzeugung gegenüber dem Stand von heute unterstellt. Im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* wurde die dann zu erwartende Biogaserzeugung gegenüber dem Referenzfall um die Hälfte gesteigert. Dies entspricht einem Emissionsrückgang um rund 130 kt/a CH<sub>4</sub> und einem CO<sub>2</sub>-Bonus von 3 Mio. t/a gegenüber heute (1995).

Ein geringes Rest-Emissionsminderungspotential ist bei der **Abwasserreinigung** in den neuen Bundesländern gegeben. Durch den mittelfristig aus betrieblichen Gründen zu erwartenden Ersatz der psychrophilen Schlammbehandlung in offenen Behältern werden sich die dabei anfallenden CH<sub>4</sub>-Emissionen in allen drei Szenarien deutlich reduzieren.

Die Werte für die **verbrennungsbedingten Emissionen** (incl. derjenigen aus dem Verkehrsbereich) wurden aus den Projektionen für Treibhausgase des Umweltbundesamtes (1996) übernommen. Im Bereich der **Industrieprozesse** sind in allen Fällen nur geringe Emissionsminderungen zu erwarten, weswegen sie hier rechnerisch konstant gehalten wurden. Das gleiche gilt für die CH<sub>4</sub>-Emissionen aus **Gewässern**.

Deren Wert könnte sich zwar wegen Rückgangs der anthropogen eingeleiteten organischen Substanzen vermindern, indes ist der Effekt nicht quantifizierbar.

Tabelle 9: Entwicklung der CH<sub>4</sub>-Emissionen im *Ohne-Maßnahmen-Szenario* in kt; Werte für 1995 fiktiv

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Verbrennungsbed. Emissionen	205	147	88	81	74	66	58
Kohlebergbau und -lagerung	1.222	958	836	658	657	656	654
Gaswirtschaft	327	323	265	208	150	142	134
Industrieprozesse	14	14	14	14	14	14	14
Fermentation	1.430	1.172	1.182	1.179	1.175	1.171	1.162
Tierische Abfälle	614	505	509	508	506	505	501
Deponien	1.777	1.777	1.777	1.777	1.777	1.777	1.777
Abwasserbehandlung	93	67	40	40	40	40	40
Gewässer	318	318	318	318	318	318	318
Summe (gerundet)	6.000	5.280	5.030	4.780	4.710	4.690	4.660

Tabelle 10: Entwicklung der CH<sub>4</sub>-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Verbrennungsbed. Emissionen	205	147	88	81	74	66	58
Kohlebergbau und -lagerung	1.222	783	686	544	543	541	540
Gaswirtschaft	327	323	265	208	150	142	134
Industrieprozesse	14	14	14	14	14	14	14
Fermentation	1.430	1.172	1.182	1.179	1.175	1.171	1.162
Tierische Abfälle	614	505	492	474	456	437	417
Deponien	1.777	1.777	1.125	464	307	207	140
Abwasserbehandlung	93	67	40	40	40	40	40
Gewässer	318	318	318	318	318	318	318
Summe (gerundet)	6.000	5.110	4.210	3.320	3.080	2.940	2.820

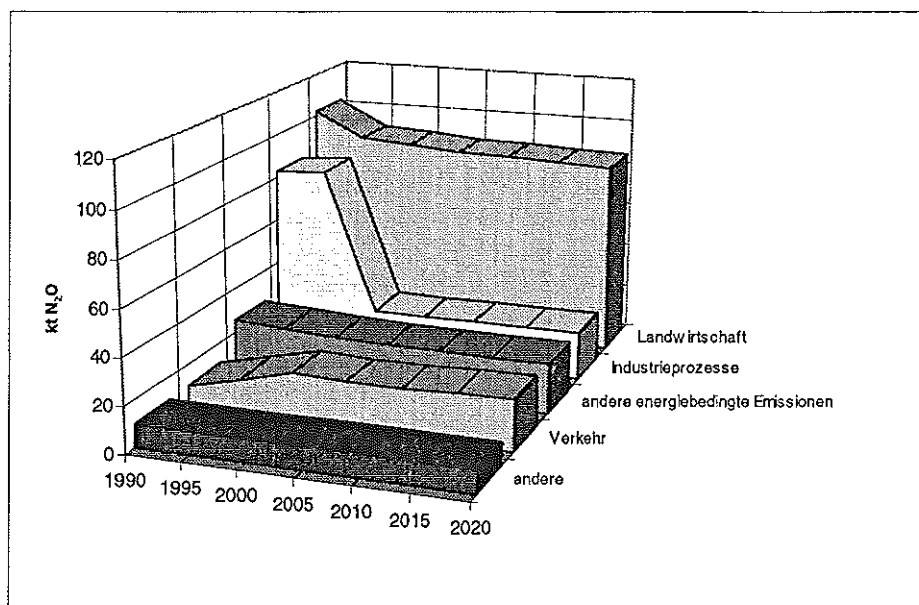
Tabelle 11: Entwicklung der CH<sub>4</sub>-Emissionen im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Verbrennungsbed. Emissionen	205	147	88	81	74	66	58
Kohlebergbau und -lagerung	1.222	783	602	421	420	418	417
Gaswirtschaft	327	323	265	208	150	142	134
Industrieprozesse	14	14	14	14	14	14	14
Fermentation	1.430	1.172	1.182	1.179	1.175	1.171	1.162
Tierische Abfälle	614	505	484	457	430	404	376
Deponien	1.777	1.777	1.125	464	307	207	140
Abwasserbehandlung	93	67	40	40	40	40	40
Gewässer	318	318	318	318	318	318	318
Summe (gerundet)	6.000	5.110	4.120	3.180	2.930	2.780	2.660

### 3.2 N<sub>2</sub>O

Im Referenzfall, dem *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* (Tabelle 13), dürften die N<sub>2</sub>O-Emissionen bis nach dem Jahr 2000 auf deutlich unter 170 kt/a zurückgehen. In CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht dies einem Rückgang der jährlichen Treibhausgasemissionen um gut 20 Mio. t/a gegenüber 1990. Hierzu tragen insbesondere die Minderungserfolge bei den Industrieprozessen, also der Effekt der erfolgten abgasseitigen Minderungsmaßnahmen bei der Adipinsäureproduktion, und in der Landwirtschaft bei. Die Entwicklung der N<sub>2</sub>O-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* und der Beitrag der einzelnen Emissionsquellen ist in Abbildung 6 veranschaulicht.

Abbildung 6: Entwicklung der N<sub>2</sub>O-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* nach Emissionsquellen

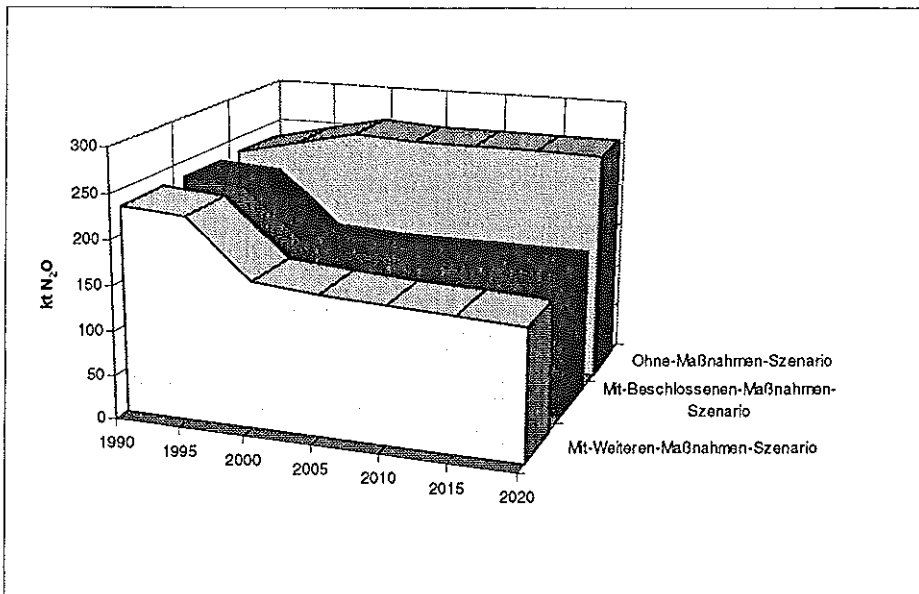


Im Falle des *Ohne-Maßnahmen-Szenarios* (Tabelle 12) würden die Emissionen auf einem Niveau von gut 20 % über demjenigen von 1990 verharren. Dem produktionsbedingten Anstieg bei den Industrieprozessen und den Mehremissionen im Verkehrsbereich (emissionssteigernder Einfluß des Abgaskatalysators) stünden nach 1995 nur vergleichsweise geringe Verringerungen in der Landwirtschaft gegenüber.

Das *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* (Tabelle 14) ist insbesondere durch weitergehende Maßnahmen in der Landwirtschaft gekennzeichnet, wodurch sich Gesamtemissionen von unter 150 kt im Jahr 2020 ergeben würden.

Die Emissionsentwicklung in den drei betrachteten Szenarien ist Abbildung 7 zu entnehmen.

Abbildung 7: Entwicklung der  $N_2O$ -Emissionen in den drei betrachteten Szenarien



**Adipinsäure** ist ein wichtiges Vorprodukt für Kunstfasern (Nylon 6.6). Bei den gängigen Verfahren entsteht  $N_2O$ , das bislang überwiegend in die Atmosphäre abgegeben wurde. Im Jahr 1990 waren dies bei den beiden deutschen Herstellern insgesamt rund 70 kt.

Wie schon bei der Darstellung der bereits beschlossenen Emissionsminderungsmaßnahmen (Abschnitt 2.1.3.1) ausgeführt, nahm der kleinere der beiden deutschen Hersteller im Jahr 1993 eine thermische Zersetzungsanlage für  $N_2O$  in Betrieb, in der  $N_2O$  fast vollständig zersetzt wird. Nach anfänglichen, thermisch bedingten Schwierigkeiten läuft die Anlage mittlerweile problemlos. Zur Zeit entwickelt der größere der beiden Hersteller Katalysatoren für eine katalytische  $N_2O$ -Zerlegung. Das Unternehmen strebt an, je nach technischer Zuverlässigkeit ein langjähriges  $N_2O$ -Minderungspotential in der Größenordnung von 90 bis 95 % zu erreichen. Mit der Inbetriebnahme der  $N_2O$ -Zersetzungsanlage ist aus gegenwärtiger Sicht spätestens im Jahr 1999 zu rechnen.

Unter Zugrundelegung der von den Herstellern genannten Produktionserwartungen (keine wesentliche Steigerung gegenüber heute) bzw. bei unterstellter Ausschöpfung der derzeit genehmigten Produktionskapazitäten zum Zwecke einer Abschätzung der zu erwartenden Emissionsobergrenze läßt sich folgende Emissionsentwicklung für das *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* angeben: Etwa ab dem



Jahr 1995, also dem Zeitpunkt der erfolgten Aufnahme des optimierten Dauerbetriebs der erstgenannten thermischen Zersetzungsanlage, betrug die jährliche Emission rund 70 kt/a. Ab 1999 oder früher, wenn der optimierte Dauerbetrieb des geplanten katalytischen Verfahrens aufgenommen wird, ist mit einem deutlichen Rückgang auf unter 10 kt/a zu rechnen. Längerfristige Produktionserwartungen für das Jahr 2000 und später lassen sich naturgemäß nicht angeben, indes kann davon ausgegangen werden, daß zusätzliche Produktionskapazitäten mit ähnlich wirksamen Emissionsminderungseinrichtungen ausgestattet sein würden.

Im rein theoretischen Fall ohne Emissionsminderung (*Ohne-Maßnahmen-Szenario*) würden die  $N_2O$ -Emissionen der erwarteten Produktionsentwicklung entsprechend auf rund 99 kt/a bzw. im Falle der Ausnutzung der genehmigten Produktionskapazität auf rund 107 kt/a ansteigen. Wie bei der Maßnahmendiskussion erwähnt, dürften im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* die realistischerweise erschließbaren Minderungspotentiale weitgehend ausgeschöpft sein, so daß im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* keine zusätzlichen Verringerungen angesetzt wurden.

Die Emissionsentwicklung bei der Adipinsäureproduktion ist in Tabelle 12 bis Tabelle 14 unter "Industrielle Prozesse" subsummiert, die außerdem z. B. Salpetersäureherstellung sowie Herstellung von  $N_2O$  als solchem ("Lachgas") umfassen. Diese Emissionen wurden aber unter Vernachlässigung evt. denkbarer Minderungen auch in diesen Bereichen für die Szenarioberechnungen konstant gehalten.

Im Bereich der **Landwirtschaft** wurde in Absprache mit dem BML generell ein leichter Rückgang der genutzten Fläche von 18,03 Mio. ha im Jahr 1990 auf rund 16,4 Mio. ha im Jahr 2020 unterstellt.

Wie eingangs bei der Darstellung der gegenwärtigen Emissionssituation erwähnt, kann gemäß einer Rechenvorschrift des Intergovernmental Panel on Climate Change (Watson et al. 1996, IPCC 1996) davon ausgegangen werden, daß die  $N_2O$ -Emissionen weitgehend von den Stickstoffmengen, die landwirtschaftlich ausgebracht werden, bestimmt werden.

Die aufgebrachte Stickstoffmenge betrug im Jahr 1990 gut 3.130 kt. Davon stammten knapp 1.870 kt aus mineralischem Dünger und schätzungsweise knapp 1.270 kt aus Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft. Die Wirtschaftsdüngermenge ergibt sich aus Berechnungen des Umweltbundesamtes für den Nationalbericht, die auf einer Mengen- und Nährstoffbilanz organischer Rest- und Abfallstoffe für die Landkreise Cloppenburg und Vechta sowie das Oldenburger Münsterland aufbauen. Diese Werte wurden im Rahmen der hier vorliegenden Berechnungen zugrunde gelegt, nachdem ursprünglich von rund 1.600 kt Wirtschaftsdünger ausgegangen worden war (vgl. hierzu z. B. Heinemeyer in Schön/Walz et al. 1993, Beese 1994, Weingarten et al. 1995). Insgesamt betragen die landwirtschaftlich bedingten Emissionen

somit im Jahr 1990 gut 100 kt  $\text{N}_2\text{O}$  (einschließlich der indirekten Emissionen aus Gewässern, der indirekt durch Stickstoffeinträge aus der Luft verursachten Emissionen aus Böden sowie der direkt im Stall emittierten Mengen aus tierischen Abfällen).

Im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* wurde mittelfristig ein leichter Rückgang der Stickstoffzufuhr als Folge z. B. der bestehenden Düngeverordnung, aber insbesondere auch als Fortsetzung eines in der jüngsten Vergangenheit beobachteten Trends von gegenwärtig (1995) gut 162 kg/ha auf 160 kg/ha im Jahr 2005 unterstellt. Dies entspricht einem Rückgang der insgesamt aufgebrauchten Stickstoffmenge auf rund 2.700 kt/a. Danach wird von gleichbleibendem Stickstoffeinsatz pro ha bis zum Ende des betrachteten Zeithorizontes im Jahr 2020 ausgegangen. Dementsprechend betragen im Jahr 2005 die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen der Landwirtschaft zusammen rund 88 kt/a. Vor allem wegen des Rückganges der landwirtschaftlich genutzten Fläche und, in geringerem Umfang, wegen leicht rückläufiger Wirtschaftsdüngermengen werden in diesem Referenzfall die Emissionen bis 2020 weiter auf gut 85 kt/a zurückgehen.

Im *Ohne-Maßnahmen-Szenario* wurde der spezifische Wert des Basisjahres 1990 für die Stickstoffzufuhr (knapp 174 kg/ha) eingefroren. Dabei wurde unterstellt, daß der beobachtete spezifische Rückgang zwischen 1990 und 1995 - abgesehen vom gesunkenen Viehbestand - zumindest teilweise bereits eine Folge ergriffener Maßnahmen und eine vorweggenommene Wirkung der 1996 in Kraft getretenen Düngeverordnung war, deren Vorlage im bisherigen IMA-Katalog als Klimaschutzmaßnahme gezählt wurde.

Die Abschätzung der Wirkung der in Abschnitt 2.2.2.1 vorgeschlagenen weitergehenden Maßnahmen hängt vor allem von der Intensität und Eingriffstiefe ab, mit der sie umgesetzt werden: Werden diese erhöht, nimmt das Ausmaß der Wirkungen zu und vice versa. Die Bereitschaft zur Ergreifung weitgehender Maßnahmen hängt wesentlich davon ab, welche Folgen für die Umstrukturierung der Landwirtschaft man bereit ist, in Kauf zu nehmen. Eine sehr weitgehende Maßnahme könnte z. B. darin bestehen, bis zum Jahr 2020 einen vollständigen Umstieg auf einen ökologischen Landbau zu vollziehen und den Einsatz von Mineraldünger praktisch auf Null zu reduzieren, auch wenn dies zu erheblichen spezifischen Erträgrückgängen und -schwankungen führen könnte (Schmitz/Hartmann 1993; Hoffmann 1993).

Für das *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* wurde eine geringere Intensität der Maßnahmen angenommen. Es wurde ein Rückgang der Gesamtmenge eingesetzten Stickstoffdüngers auf etwa 2.540 kt N im Jahr 2005 und knapp 2.140 kt N im Jahr 2020 unterstellt, die sich aus jeweils gut 1.000 t Wirtschaftsdünger-N und 1.500 bzw. 1.100 t Mineraldünger-N zusammensetzt. Spezifisch entspricht dies einem Rückgang des Stickstoffeinsatzes auf 150 kt/ha in 2005 und auf 130 kt/ha in 2020.

Die Verringerung der eingesetzten Stickstoffmengen entspricht dabei mittelfristig in etwa einem Szenario von Weingarten et al. (1995). Diese errechnen in einer von mehreren Strategien für das Jahr 2005 den durchschnittlichen Bedarf an Wirtschafts- und Mineraldünger auf etwas über 150 kg N/ha, wobei sie davon ausgehen, daß bis dahin die durchschnittlichen Stickstoffüberschüsse auf etwa 50 kg/ha halbiert werden. Damit wäre die Forderung nach Halbierung der Nährstoffeinträge in die Meere zu erfüllen. Zugleich wird dies von Gesellschaften/Verbänden als erste pragmatische, noch tolerierbare Obergrenze in die Diskussion gebracht (DVWK 1995). In einem "PolitikszENARIO" wie hier läßt sich diese Entwicklung bis zum Ende des Betrachtungshorizontes fortschreiben, indem weiter sinkende spezifische Stickstoffausbringungen angenommen werden.

Die Berechnung der N<sub>2</sub>O-Emissionen geht wie beim Referenzszenario entsprechend IPCC-Vorschrift vor. Unter diesen Annahmen kommt es im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* im Jahr 2020 zu N<sub>2</sub>O-Emissionen von insgesamt knapp 71 kt aus der Landwirtschaft incl. der Stallemissionen. Dies entspricht einer Reduktion der N<sub>2</sub>O-Emissionen aus diesen Bereichen um gut 31 kt gegenüber 1990 bzw. um weitere 15 kt gegenüber dem *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario*.

Eine noch weitergehende Reduktion der N<sub>2</sub>O-Emissionen könnte sowohl an einem vollständigen Umstieg auf einen ökologischen Landbau, als auch an einer Reduktion des Fleischverbrauchs ansetzen. Durch letzteres käme es zu entsprechenden Reduktionen des Viehbestandes und damit sowohl zu Verminderungen der Anbaufläche von Futtermitteln als auch des Anfalls von Wirtschaftsdünger, der auf die landwirtschaftlichen Flächen verbracht wird.

Bezüglich der **verbrennungsbedingten Emissionen** einschließlich der Emissionen aus dem **Kraftfahrzeugverkehr** wurden für alle drei Szenarien die Daten der Projektionen für Treibhausgase des Umweltbundesamtes (1996) übernommen. Es wurde dabei unterstellt, daß die emissionssteigernde Wirkung der Einführung des Abgaskatalysators auch im *Ohne-Maßnahmen-Szenario* zum Tragen kommt, diese Maßnahme also nicht als Klimaschutzmaßnahme betrachtet wird (trotz Emissionsminderung bei indirekt klimawirksamen VOC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen).

Bei den sonstigen Prozessen ("**Andere**") sind nur geringe Effekte zu vermuten, der ausgewiesene Emissionswert von 10 kt/a wurde in allen Szenarien konstant gehalten.

Tabelle 12: Entwicklung der N<sub>2</sub>O-Emissionen im *Ohne-Maßnahmen-Szenario* in kt; Werte für 1995 fiktiv

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Verkehr	11,0	16,5	22,0	21,0	21,0	21,5	22,0
Andere energiebedingte Emissionen	26,0	24,7	23,4	22,1	22,1	22,1	22,1
Industrieprozesse	83,0	101,1	113,0	113,0	113,0	113,0	113,0
Landwirtschaft	102,3	96,6	95,7	94,8	93,9	93,0	92,1
- direkt aus Anwendung von N-Dünger	52,8	50,9	50,3	49,7	49,2	48,7	48,2
- indirekt aus N-Einträgen in Gewässer	31,8	30,6	30,2	29,9	29,6	29,3	29,0
- indirekt aus atmosphärischen N-Einträgen	6,9	6,3	6,3	6,3	6,2	6,2	6,1
- Stallemissionen	10,8	8,8	8,9	8,9	8,8	8,8	8,7
Andere	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Summe (gerundet)	232	249	264	261	260	260	259

Tabelle 13: Entwicklung der N<sub>2</sub>O-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Verkehr	11,0	16,5	22,0	21,0	21,0	21,5	22,0
Andere energiebedingte Emissionen	26,0	24,7	23,4	22,1	22,1	22,1	22,1
Industrieprozesse	83,0	84,3	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
Landwirtschaft	102,3	91,0	89,5	88,0	87,2	86,3	85,5
- direkt aus Anwendung von N-Dünger	52,8	47,5	46,6	45,7	45,3	44,8	44,4
- indirekt aus N-Einträgen in Gewässer	31,8	28,6	28,0	27,5	27,2	26,9	26,7
- indirekt aus atmosphärischen N-Einträgen	6,9	6,1	6,0	5,9	5,9	5,8	5,8
- Stallemissionen	10,8	8,8	8,9	8,9	8,8	8,8	8,7
Andere	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Summe (gerundet)	232	227	166	163	162	161	161

Tabelle 14: Entwicklung der N<sub>2</sub>O-Emissionen im *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Verkehr	11,0	16,5	22,0	21,0	21,0	21,5	22,0
Andere energiebedingte Emissionen	26,0	24,7	23,4	22,1	22,1	22,1	22,1
Industrieprozesse	83,0	84,3	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
Landwirtschaft	102,3	91,0	87,0	82,9	78,9	74,9	70,8
- direkt aus Anwendung von N-Dünger	52,8	47,5	45,1	42,7	40,4	38,0	35,7
- indirekt aus N-Einträgen in Gewässer	31,8	28,6	27,1	25,7	24,3	22,9	21,4
- indirekt aus atmosphärischen N-Einträgen	6,9	6,1	5,9	5,6	5,4	5,2	5,0
- Stallemissionen	10,8	8,8	8,9	8,9	8,8	8,8	8,7
Andere	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Summe (gerundet)	232	227	164	157	153	150	146

### 3.3 NMVOC

Die folgende Tabelle enthält die Ergebnisse des *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenarios* in einer Untergliederung nach Emittentengruppen.

Über die quantifizierbaren Wirkungsschätzungen für Lackierungen und die Verteilung von Ottokraftstoff wurde auf ein *Ohne-Maßnahmen-Szenario* rückgerechnet, welches in der Tabelle nachrichtlich aufgeführt ist.

Tabelle 15: Entwicklung der prozeßbedingten NMVOC-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* sowie im *Ohne-Maßnahmen-Szenario* (alte und neue Bundesländer)

	1990	2005	2020
	Mio. t NMVOC		
FCKW und Halone	0,04	0	0
Lösemittelverwendung	1,2	0,9	0,9
Industrieprozesse	0,2	0,1	0,1
Gewinnung und Verteilung von Brennstoffen	0,2	0,04	0,03
Summe	1,6	1,1	1,1
<i>nachrichtlich: Ohne-Maßnahmen-Szenario</i>			
Summe	1,6	1,4	1,4
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts			

Die prozeßbedingten NMVOC-Emissionen nehmen damit zwischen 1990 und 2005 um ca. 30 % ab, wobei die beiden größten Verursacherbereiche auch den größten Beitrag zur Emissionsminderung erbringen.

Die bereits umgesetzten Maßnahmen tragen im Jahre 2005 mit ca. 300.000 t NMVOC zur Emissionsminderung bei.

Tabelle 16: Instrumente zur NMVOC-Emissionsminderung und ihre Wirkungen, 2005

Lfd. IMA-Nr.	Maßnahme/ Kurzbezeichnung	Wirkungsbereich	Beginn der Wirksamkeit	Wirksamkeit im Zeitablauf	Wirkung der Maßnahme 2005	Wirkung gegenüber Referenz 2005	Kosten für Bundeshaushalt
					Mio. t		
Bereits wirkende Maßnahmen							
	TA Luft '86 Novelle 2. BImSchV Umweltzeichen 12a TRGS 610	Lösemittelermissionen	ab 1990		0,150	-	?
	20. BImSchV 21. BImSchV	Verteilung von Ottokraftstoff	1995		0,160	-	?
Noch ausstehende/vorgeschlagene Maßnahmen							
	Lösemittelverordnung		1998		0,160		
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts							

Da die weiteren Maßnahmen nur für den Bereich der Lösemittelverwendung bei der Lackierung quantifiziert wurden, unterscheidet sich die Projektion für ein *Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario* nur wenig von den anderen Szenarien.

Tabelle 17: Entwicklung der prozeßbedingten NMVOC-Emissionen im *Mit-Weiteren -Maßnahmen-Szenario* (alte und neue Bundesländer)

	1990	2005	2020
	Mio. t NMVOC		
FCKW und Halone	0,04	0	0
Lösemittelverwendung	1,2	0,7	0,4
Industrieprozesse	0,2	0,1	0,1
Gewinnung und Verteilung von Brennstoffen	0,2	0,04	0,03
Summe	1,6	0,9	0,6
<i>nachrichtlich: Ohne-Maßnahmen-Szenario</i>			
Summe	1,6	1,4	0,9
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts			

### 3.4 Nichtenergiebedingtes CO<sub>2</sub>

Die sich für das *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* ergebenden nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Nachrichtlich aufgeführt sind die Ergebnisse eines *Ohne-Maßnahmen-Szenarios*, das über die quantifizierten Wirkungsschätzungen ermittelt wurde.

Tabelle 18: Entwicklung der nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* sowie im *Ohne-Maßnahmen-Szenario* (alte und neue Bundesländer)

	1990	2005	2020
	Mio. t CO <sub>2</sub>		
Zementklinker	16,15	14,87	13,77
Kalk	6,42	6,42	5,63
Hüttenaluminium	0,90	0,48	0,24
Glas	1,21	1,57	1,67
Kalziumkarbid	0,35	0,05	0,03
Ammoniak	1,75	1,34	1,17
Soda	0,74	0,57	0,49
Summe	27,52	25,29	22,99
<i>nachrichtlich: Ohne-Maßnahmen-Szenario</i>			
Summe	27,52	25,46	23,17
Quelle: Berechnungen des Öko-Instituts			

Der quantifizierbare Effekt durch erhöhtes Glasrecycling beträgt dabei im *Mit-Beschlossenen-Maßnahmen-Szenario* ca. 170.000 t CO<sub>2</sub>. Dieser Wert entspricht etwa einer Emissionsminderung von 0,6 % der gesamten nichtenergiebedingten Emissionen im Basisjahr. Ohne die erhöhten Recyclingraten hätte die durch die Glasherstellung verursachte CO<sub>2</sub>-Emission nicht gedämpft werden können. Neben diesem Effekt ergeben sich die Emissionsminderungen im hier zu betrachtenden Sektor



## 4 Literatur

### 4.1 Literatur zu CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O

(91/676/EWG). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 375, S. 1 - 8

Angerer, G. et al. (1997): Innovationspotentiale von Umwelttechnologien. Innovationsstrategien im Spannungsfeld von Technologie, Ökonomie und Ökologie. Abschlußbericht für das Umweltbundesamt, FuE-Vorhaben 101 07 382. Karlsruhe, April 1997.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1993 bis 1995. Vorläufige Angaben; Stand 12. Juni 1996. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (Bearb.), Berlin 1996

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energiebilanz der Bundesrepublik für das Jahr 1990, Essen 1991

BASF AG: Schriftliche und mündliche Informationen, 1994 bis 1997

Bayer AG: Schriftliche und mündliche Informationen, 1994 bis 1997

Becker, H.: Reduzierung des Düngemiteleinsatzes, Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Band 416, Landwirtschaftsverlag, Münster 1992

Beese, F.: Gasförmige Stickstoffverbindungen. Studie D in: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Studienprogramm, Band 1 Landwirtschaft, Teilband I. Economica Verlag, Bonn 1994

BML (Bundesministerium für Landwirtschaft): Entwicklung des Viehbestandes. Vorläufige Angaben für die Jahre 1989 bis 1995. BML 215-0808, Bonn 1996

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit): Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn 1997

BNN (Badische Neueste Nachrichten): Neuer Thermoselectanbieter in der Region. Ehemalige Badenwerkexpertin als Geschäftsführerin / Kreis Esslingen springt ab. Karlsruhe, BNN v. 30.09.95

Chemische Rundschau: Lachgasemission reduzieren. Heft 4, 1997

Deutsche Ausgleichsbank: So fördern wir erneuerbare Energien. Finanzierungshilfen, Fallbeispiele, Ansprechpartner. Bonn 1996

Düngeverordnung: Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung) vom 26. Januar 1996. Bundesgesetzblatt Teil I, S. 118 - 121



- DVWK u. a. 1995: Maßnahmen zum verstärkten Gewässerschutz im Verursacherbereich Landwirtschaft, DVWK Materialien 2/1995, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn 1995
- Energie Spektrum: Böblingen setzt auf Rostfeuerung. Energie Spektrum 9/95, S. 48
- Entsorgungspraxis: BASF reduziert Lachgasemission. Heft 4, 1997.
- EU-Nitratrichtlinie: Richtlinie des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigungen durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen
- Frahm, T. et al.: Evaluierung der Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien durch das Bundesministerium für Wirtschaft (1994 - 1996). Endbericht für das Bundesministerium für Wirtschaft. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, 1997.
- Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus: Stellungnahme zu weitergehenden Maßnahmen der Methan-Minderung. Essen im Februar 1995
- Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus: Verwertung von Grubengas im deutschen Steinkohlenbergbau. Erklärung der Steinkohlenwirtschaft. Essen, 22. Oktober 1990
- Hoffmann, M.: Erfahrungen im ökologischen Landbau, in: Schmitz, P. und Hartmann, M. (Hrsg.), Landwirtschaft und Chemie, Wissenschaftsverlag Vauk, Kiel 1993, S. 110-127
- Houghton, J. T. et al.: Climate Change 1995, The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge 1996.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. 1996
- Isermann, K.: Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft, ihre Auswirkungen auf die Umwelt und ursachenorientierte Lösungsansätze sowie Lösungsaussichten zur hinreichenden Minderung. Studie E in: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Studienprogramm, Band 1 Landwirtschaft, Teilband I. Economica Verlag, Bonn 1994
- Schmitz, P. und Hartmann, M.: Die Studie im Überblick, in: Schmitz, P. und Hartmann, M. (Hrsg.), Landwirtschaft und Chemie, Wissenschaftsverlag Vauk, Kiel 1993, S. 1-33
- Schön, M. et al.: Anthropogene  $N_2O$ - und  $CH_4$ -Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland - Phase II. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Forschungsbericht 104 01 108/02. Karlsruhe 1995
- Schön, M.: Industrielle GÜlleaufbereitung und -verwertung. Technikreport in Angerer et al., 1997.

- Schön, M.; Walz, R. et al.: Emissionen der Treibhausgase Distickstoffoxid und Methan in Deutschland. UBA Berichte 9/93. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1993
- SRU: Konzepte einer dauerhaft-umweltgerechten Nutzung ländlicher Räume, Sondergutachten des Rats von Sachverständigen für Umweltfragen, Stuttgart 1996
- Statistisches Bundesamt: Fachserie 19, Reihe 1.1, Öffentliche Abfallbeseitigung, Poeschel-Verlag, 1990 a.
- Statistisches Bundesamt: Fachserie 19, Reihe 1.2, Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern, Poeschel-Verlag, 1990 b
- Statistisches Bundesamt: Persönliche Mitteilung, Sept. 1996
- Stromeinspeisungsgesetz: Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisungsgesetz) vom 7. Dezember 1990. Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 2633 - 2634; geändert durch Artikel 5 des Gesetzes zur Sicherung des Einsatzes von Steinkohle in der Verstromung und zur Änderung des Atomgesetzes und des Stromeinspeisungsgesetzes vom 19. Juli 1994. Bundesgesetzblatt Teil I, S. 1618 - 1623
- Strotmann, B.: Analyse der Auswirkungen einer Stickstoffsteuer auf Produktion, Faktoreinsatz, Agrareinkommen und Stickstoffbilanz unter alternativen agrarpolitischen Rahmenbedingungen - eine regionalisierte Sektoranalyse für Regionen der alten Länder der Bundesrepublik Deutschland, Studien zur Wirtschafts- und Agrarpolitik Band 6, Wehle Verlag, Witterschlick/Bonn 1992
- TA Siedlungsabfall: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993, Beil. BAnz. Nr. 99a
- TA-Abfall: Gesamtfassung der Zweiten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991. GMBI S. 139.
- Umweltbundesamt: persönliche Mitteilungen des Fachgebietes III.3.5, Berlin 1995
- Umweltbundesamt: Projektionen für Treibhausgase. Ergänzung vom April 1996 zum "1. Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen". Stand 26. 04. 1996. Berlin 1996
- Watson, R. T. et al.: Climate Change 1995. Impacts, Adaptions and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge 1996.
- Weingarten, P. et al.: Abschätzung der Auswirkungen von Vorsorgestrategien zum Grundwasserschutz im Bereich Landwirtschaft, in: Agrarwirtschaft, Band 44, 1995, Heft 4/5, S. 191-204

WMO (World Meteorological Organization): Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 37. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Geneva 1995

## 4.2 Literatur zu NMVOC und nichtenergiebedingtem CO<sub>2</sub>

- Aichinger, H. (1996): Die neue Lösemittelverordnung. In: FGU Berlin: Sommer-smog, Maßnahmen zur Minderung der Lösemittlemissionen aus Lackieranlagen, Fortbildungszentrum Gesundheits- und Umweltschutz Berlin e.V., 28.-29.3.1996.
- Bernard, H., De Jong, W.S. (1989): Glas. In: Ullmann (1989): Enzyklopedie der Industriellen Chemie, Bd. A12, S. 365ff; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Bliesener K.M. et al. (1991): Perspektiven der Zuckertechnologie, 1. Verfahrensentwicklungen zur Schnitzelentwässerung. Zuckerindustrie 116 (11), S. 978-986.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (1994): Erster Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn.
- Borgholm, H.E. (1992): Umweltentlastung durch Verwertung von Flugasche als Rohmehlkomponente. Zement - Kalk - Gips 45 (4), S. 163-170.
- Bräutigam, Max; Kruse, D.K. (1992): Ermittlung der Emissionen organischer Lösemittel in der Bundesrepublik Deutschland. Consulting Services, Köln; Umweltbundesamt Forschungsbericht 104 04 116/01.
- Brinkmann, W. (1991): Fakten und Gedanken um die Zuckerrübenemittetechnik. Zuckerrübe 40 (1), S. 64-65.
- Buchholz, K., Bruhns, M. (1992a): Über die Kampagne 1991 und neuere technische Entwicklungen; Zuckerindustrie 117 (5), S. 317-335.
- Buchholz, K. et al. (1992b): Perspektiven der Zuckertechnologie, 4. Fortschritte in der Emissionsminderung. Zuckerindustrie 117 (12), S. 971-978.
- Buchholz, K., Bruhns, M. (1993): Über die Kampagne 1991 und neuere technische Entwicklungen. Zuckerindustrie 118 (5), S. 321-338.
- Büchner, W.; Schliebs, R.; Winter, G., Büchel, K.H. (1984): Industrielle Anorganische Chemie. Verlag Chemie, Weinheim.
- Daum, J.P. (1993): Was kostet Wasserstoff? Chemieanlagen und -verfahren 1993 (9), S. 16 - 18.
- Dietz, Th. (1995): Industrielle Wasserlacke und ihre besonderen Verarbeitungsbedingungen. In: Ondratschek: Taschenbuch für Lackierbetriebe 1996; Vincentz Verlag, Hanover.

- DLI (Deutsches Lackinstitut) (1995): EINBLICKE, Die Lackindustrie in Deutschland. Frankfurt.
- DLI (Deutsches Lackinstitut) Nr. 6: Fakten zu Lacken und Farben Nr. 6: Lösemittel. Frankfurt (ohne Jahresangabe).
- Dopfer, J. et al. (1994): Bericht über die Auswirkungen der Abfallabgabe in Baden-Württemberg. Öko-Institut.
- Dopfer, J.; Both, B. (1996): Glas: Recycling und Einsatzgebiete - Stand, Probleme, Perspektiven. Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf.
- EU (1994): Richtlinie 94/63/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 1994 zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC-Emissionen) bei der Lagerung von Ottokraftstoff und seiner Verteilung von den Auslieferungslagern bis zu den Tankstellen; Amtsblatt L 365/24 vom 31.12.1994.
- EU (1996): European Commission, Directorate General XI: Consultation Paper of the Commission Services: A Community Strategy for the Integrated Control of Emissions of Dangerous and Long Range Effects Substances from Smaller Installations, 5.9.1996/XI/013699 XI.E.1./LR/D(96).
- Falbe, J.; Regitz, M. (1990): Römpp Chemie Lexikon. Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York.
- Frank, W.B.; Haupin, W.E. (1985): Aluminium. In: Ullmann: Encyclopedie der Industriellen Chemie, Bd. A1, S. 459ff; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Friede, H. (1986): Traßhochofenzement - Ausgangsstoff für Beton mit besonderen Eigenschaften. Betonwerk + Fertigteil-Technik 1986 (6), S. 384-393.
- Große-Ophoff, M. et al. (1996): Anforderungen an eine Verordnung für nicht genehmigungsbedürftige Lackieranlagen, Konzeption für einen neuen Verordnungstyp. In: FGU Berlin: Sommersmog, Maßnahmen zur Minderung der Lösemittlemissionen aus Lackieranlagen, Fortbildungszentrum Gesundheits- und Umweltschutz Berlin e.V., 28.-29.3.1996.
- Gudenau, H.W., Bleck, W. (1995): Stoffliche Verwertung von Aluminium-Getränkedosendeckeln im Stahlschrott aus der Sammlung des Dualen Systems Deutschland". Institut für Eisenhüttenkunde der Rhein.-Westf. Technischen Hochschule Aachen.
- Harnisch, J., Borchers, R., Fabian, P. (1995): COS, CS<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> in Aluminium Smelter Exhaust; ESPR - Environmental Science and Pollution Research 2 (4), S. 229-232.
- Häussinger, P.; Lohmüller, R.; Watson, A. (1989): Hydrogen. In: Ullmann: Encyclopedie der Industriellen Chemie. Bd. A13, S. 297ff; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Kazadi, J.B. (1989): Laboratory study of carbon consumption as a function of electrolyte composition. Light Metals 1989, S. 523-529, zitiert nach: Chemical Abstracts 110: 181610g.

- Knoblauch, H., Schneider, U. (1995): Bauchemie. Werner-Verlag, Düsseldorf.
- Locher, F.W., Kropp, J. (1986): Cement and Concrete. In: Ullmann: Encyclopedie der Industriellen Chemie, Bd. A5, S. 489ff; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- May, Th. (1995): Emissionsminderung und Abfallvermeidung. In: Ondratschek: Taschenbuch für Lackierbetriebe 1996. Vincentz Verlag, Hannover.
- Merten, T., Liedtke, C., Schmidt-Bleek, F. (1995): Materialintensitätsanalysen von GUND-, Werk- und Baustoffen, (1) Die Werkstoffe Beton und Stahl Materialintensitäten von Freileitungsmasten. Wuppertal Papers Nr. 27, Januar 1995.
- Metallgesellschaft (Metallgesellschaft AG & World Bureau of Metal Statistics) (1995): Metallstatistik 1984-1994. Metallgesellschaft, Frankfurt.
- Müller, H. (1994): Sulfur Dioxide. In: Ullmann: Encyclopedie der Industriellen Chemie, Bd. A25, S. 569ff; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- Nähle, C. et al. (1992): Einsatz eines Pilotwäschers zur Eliminierung des gesamten Kohlenstoffs (TOC) aus der Schnitzeltrocknung. Zuckerindustrie 117 (9), S. 705-710.
- Naterstad, T. et al. (1986): Anode with low carbon loss for aluminium production; Braz. Pedido PI BR 00347 (IPC C25C-003/12), 9.9.1986, zitiert nach: Chemical Abstracts 106: 146044w.
- Pawlek, R.P. (1995): Recent developments of inert anodes for the primary aluminium industry. Part I: Aluminium 71 (2), S. 202-206 (1995), Part II: Aluminium 71 (3), S. 340-342.
- Pawlek, R.P. (1996a): 8<sup>th</sup> Slovak-Norwegian Conference on Aluminium Smelting Technology; Part I: Aluminium 72 (4), S. 220-223 (1996); Part II: Aluminium 72 (5), S. 332-335.
- Pawlek, R.P. (1996b): Review of the reduction technology sessions, Part I: Aluminium 72 (6), S. 400-403 (1996) (125<sup>th</sup> TMS Meeting, Anaheim 4-8.2.1996).
- Pazelt, N. (1992): Moderne Systeme für die Hüttensandmahlung. Zement - Kalk - Gips, 45(7), S. 342-347 (1992).
- Prognos (1995): Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020. Basel
- Qui Zhuxian, et al. (1995): Aluminium electrolysis with lithium salt-containing carbon anode. Aluminium 71 (3), S. 343-345.
- Schärer, B. (1996): Wirksamkeit von ökonomischen Instrumenten bei der Lösemittelverwendung; In: FGU Berlin: Sommersmog, Maßnahmen zur Minderung der Lösemittlemissionen aus Lackieranlagen, Fortbildungszentrum Gesundheits- und Umweltschutz Berlin e.V., 28.-29.3.1996.
- Schmidt, M. (1992a): Zement mit Zusatzstoffen - Leistungsfähigkeit und Umweltentlastung (Teil 1). Zement - Kalk - Gips 45 (2), S. 64-69.

- Schmidt, M. (1992b): Zement mit Zusatzstoffen - Leistungsfähigkeit und Umweltentlastung (Teil 2). Zement - Kalk - Gips 45 (6), S. 296-301.
- Singe, Th. (1995): Festkörperreiche Systeme. In: Ondratschek: Taschenbuch für Lackierbetriebe 1996. Vincentz Verlag, Hanover.
- StaBu (Statistisches Bundesamt) (1994): Produzierendes Gewerbe, Fachserie 4, Reihe 3.1: Produktion im produzierenden Gewerbe, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- UBA (Umweltbundesamt) (1993): Entwicklung der Lösemittlemissionen und Minderungspotentiale; Umweltbundesamt II 2.4 - 52 320/19 vom 21.10.93.
- UBA (Umweltbundesamt) (1992): Qualifizierung und Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Prozessemissionen im bisherigen Bundesgebiet und im Beitrittsgebiet 1966-1989. Umweltbundesamt, Dr. Koch, II 1.2, 25.3.1992.
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V) (1996): Aktualisierte Erklärung der deutschen Zementindustrie zur Klimavorsorge. Düsseldorf, 27.3.1996.
- Worrell, E. (1994): Potentials for Improved Use of Industrial Energy and Materials; Dissertation. Universiteit Utrecht, Faculteit Scheikunde ISBN 90-393-0772-5.
- Zulehner, W. (1993): Silicon. In: Ullmann: Encyclopedie der Industriellen Chemie. Bd. A23, S. 721ff; VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.

## Anhang

### A.1 NMVOC

#### A.1.1 Lackierung

##### A.1.1.1 Emissionsursachen

In diesem Kapitel soll nur die Lackierung betrachtet werden. Grundsätzlich nicht erfaßt ist damit die Herstellung von Farben und Lacken, die der Herstellung und Anwendung von chemischen Produkten zuzuordnen wäre. Ebenfalls nicht erfaßt ist damit auch die Entfettung und chemische Reinigung. Zwar werden Lackieranlagen fast ausschließlich mit einer vorgeschalteten Teileentfettung betrieben, jedoch sind diese Entfettungen heute überwiegend auf wässrige Basis umgestellt, so daß bzgl. der Emissionsquellen Entfettungsanlagen mit anderer Zweckbestimmung überwiegen, weshalb diese Abtrennung ihre Berechtigung hat. Problematisch ist die Auftrennung bei der Verwendung von Lösemitteln. Bei der Verwendung von Farben und Lacken auf der Basis von organischen Lösemitteln werden für den Lackierungsprozeß i.d.R. zusätzliche Lösemittel benötigt. Diese Lösemittel sollen, soweit es die verfügbaren Informationen zulassen, unter "Lackierung" erfaßt werden. Alle übrigen Lösemittelanwendungen sollen unter "übrige Lösemittelverwendung" erfaßt werden.

Unter dem Begriff der "Lackierung" sollen alle Verfahren verstanden werden, in den Erzeugnisse mit organischen Zubereitungen oder Zubereitungen, die organische Lösemittel enthalten, an der Oberfläche beschichtet werden. Nicht eingeschlossen sind damit Kleber und Imprägnierungen. Eingeschlossen sind jedoch Lasuren. NMVOC werden beim Lackieren aus folgenden Gründen freigesetzt:

- a) Verdampfung von Lösemitteln, die in den applizierten Lacken enthalten sind,
- b) Bildung und Verdampfung von chemischen Reaktionsprodukten bei der chemischen Aushärtung des Lackes,
- c) Emission von Verbrennungsprodukten aus der Feuerung für Trockner oder thermischer Nachverbrennungseinrichtungen für Abgase,
- d) Verdampfung von Lösemitteln bei der Reinigung von Anlagen oder Geräten,
- e) Verdampfung von Lösemitteln bei der Entfernung von Lacken.

Lacke und Farben bestehen grundsätzlich aus den nicht flüchtigen Bestandteilen:

- Bindemittel,
- Farbmittel,
- Hilfsstoffe.

Die drei Komponenten können in Lösemitteln physikalisch vollständig oder nur zum Teil gelöst sein. Die Aushärtung eines entsprechenden Lacke erfolgt primär durch die physikalische Verdampfung des Lösemittels. Sekundär erfolgt bei vielen Lacken eine chemische Reaktion, die die Bindung der Lackkomponenten untereinander und mit dem beschichteten Material unterstützt. Bei diesem Schritt kann es zur Bildung von niedermolekularen Verbindungen kommen, die als NMVOC freigesetzt werden.

Die physikalische und/oder chemische Aushärtung des Lackfilms wird in vielen Anwendungsbereichen durch Erwärmen des Lackfilms und des Werkstücks unterstützt. Hierdurch wird einerseits die physikalische Aushärtung durch Verdampfung der Lösemittel beschleunigt. Andererseits wird auch die chemische Aushärtung beschleunigt, bzw. überhaupt erst in Gang gesetzt. Zu einer Freisetzung von NMVOC kommt es durch die Bereitstellung von thermischer Energie oder elektrischer Energie für die Trockner. In den Fällen, in denen die Trockner der Lackieranlagen mit einer Nachverbrennung ausgerüstet sind, kann es auch zur Emission von Verbrennungsprodukten der Lacke selbst kommen.

Die Reinigung der Lackieranlagen und der eingesetzten Geräte erfolgt i.d.R. unter Einsatz von Lösemitteln, wobei diese physikalisch und chemisch wirken können. Ein Teil der eingesetzten Lösemittel verdampft vor Ort bei der Anwendung, ein anderer Teil wird ggf. zur externen Aufarbeitung abgegeben. Bei der externen Aufarbeitung kann ein Teil der Lösemittel wiedergewonnen und wieder- oder weiterverwandt werden. Sofern die Altlösemittel jedoch nicht Feuerungen zugeführt werden, werden sie nach einer mehr oder minder großen Anzahl von Nutzungen als NMVOC frei.

Im Falle von Fehlern beim Beschichtungsvorgang kann es wirtschaftlich sein, den Farb- oder Lackfilm vom Werkstück zu entfernen und dieses einem zweiten Versuch zuzuführen. Für diesen Vorgang können chemische und/oder physikalisch wirkende Substanzen oder thermische Verfahren eingesetzt werden. Bei den erstgenannten Verfahren werden entsprechend den Reinigungslösemitteln die eingesetzten Lösemittel früher oder später als NMVOC frei, sofern sie nicht einer Feuerung zugeführt werden.

### **A.1.1.2 Optionen**

#### **A.1.1.2.1 Vorbemerkung**

Zur Beschichtung von Oberflächen mit organischen Substanzen wurde ein sehr weites Spektrum von chemisch-technologischen Möglichkeiten entwickelt. Eine Reihe von chemischen und/oder technischen Produkten und Verfahren ermöglicht es, die Emission von NMVOC bei der Beschichtung zu vermeiden oder zumindest



gegenüber anderen Techniken deutlich zu reduzieren. An dieser Stelle können nur die wichtigsten Ansätze dargestellt werden, wobei zwischen Lösungen durch Änderung des Beschichtungsmaterials und Lösungen durch nachgeschaltete Abgasreinigungseinrichtungen unterschieden werden kann.

#### **A.1.1.2.2 Lösemittelarme oder lösemittelfreie Materialien**

##### **A.1.1.2.2.1 Wasserlacke**

Als physikalisches Lösungsmittel für die nicht flüchtigen Lackbestandteile kann statt der traditionell angewandten organischen Stoffe auch Wasser eingesetzt werden. Grundsätzlich setzt dies jedoch voraus, daß die entsprechenden Komponenten sich in Wasser lösen oder zumindest in eine applizierbare Form bringen lassen. Es wird insofern zwischen wasserlöslichen und wasserverdünnbaren Bindemitteln unterschieden. Für die Lösung und den Aushärtungsprozeß benötigen die entsprechenden Lacke, auch wenn Wasser das "Basislösemittel" ist, einen mehr oder weniger großen Anteil von organischen Lösemitteln, so daß auch die Applizierung von Wasserlacken mit der Emission von NMVOC verbunden sein kann.

Der Anwendungsbereich der Wasserlacke hat sich in den letzten zehn Jahren deutlich erweitert und ist immer noch in Bewegung. Wesentliche Unterschiede zu den Lacken auf der Basis von organischen Lösemitteln sind:

**Brennbarkeit:** Da Wasser nicht brennbar ist, sind bei der Lackbereitstellung und -applikation deutlich geringere Maßnahmen zum Brand- und Explosionsschutz erforderlich.

**Toxizität:** Die Gefährdung der Mitarbeiter durch Lösemittel ist deutlich reduziert. Die zur Einhaltung von MAK-Werten erforderlichen Maßnahmen können deutlich reduziert werden.

**Verdampfungsenthalpie:** Die Verdampfungsenthalpie des Wassers ist deutlich höher, als der organischen Lösemittel. Für die Trocknung des Lackfilms muß daher i.d.R. dem Trockner mehr Energie bezogen auf die beschichtete Oberfläche zugeführt werden.

**Luftfeuchtigkeit:** Da das Lösemittel Wasser auch als natürlicher Bestandteil der Luft vorkommt, muß der künstliche und natürliche Wasserdampfgehalt der Luft im Bereich der Lackierung kontrolliert werden. Dies kann den Einsatz von Luftentfeuchtungstechnik erforderlich machen.

**Korrosion:** Im Gegensatz zu den meisten organischen Lösemitteln können die Werkstoffe der Werkzeuge oder der zu beschichtenden Materialien mit Wasser chemisch reagieren. Ein spezielles Problem ist die Reaktion des Wassers mit Aluminiumplättchen, die in Lacken mit "Metallic-Effekt" enthalten sind.

Polarität des Wassers: Durch die Polarität des Wasser können sich im Lack Salze lösen, die Reaktionen mit dem beschichteten Material oder den Werkzeugen auslösen oder beschleunigen.

Oberflächenspannung: Bedingt durch die Polarität des Wassers ergibt sich auch eine hohe Oberflächenspannung. Dies kann die Zerstäubung des Lacks und die Benetzung des Werkstücks erschweren. Die Tendenz zum Einschluß von Luft und zur Bildung von Tropfen wird verstärkt.

Die Wirkung der genannten ungünstigen Eigenschaften kann in den meisten Fällen durch chemische Zusätze oder verfahrens- bzw. anlagentechnische Maßnahmen verhindert oder gemindert werden (Dietz 1995).

Obwohl der Ersatz von Lacken auf der Basis von organische Lösemitteln im Mittelpunkt von Optimierungsbestrebungen stand, zeigte sich, daß mit Wasserlacken auch chemisch-technische Lösungen möglich sind, die mit Lösemittellacken nicht durchführbar waren. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Elektro-Tauchlackierung. Hierbei wird durch das Anlegen einer Spannung zwischen dem eingetauchten Werkstück und der Tauchwanne der Lack auf dem Werkstück abgeschieden. Neben der Umstellung der Vorbehandlung der KFZ-Karosserien durch wässrige Verfahren war die Einführung der Elektro-Tauchlackierung der entscheidende Schritt, der die Anwendung von Wasserlacken für die weiteren Lackschichten der KFZ herbeiführte.

#### **A.1.1.2.2.2 High-Solids**

Eine Minderung der Emissionen bezogen auf die beschichtete Oberfläche ist möglich, wenn der Festkörpergehalt des verarbeiteten Lackes erhöht wird. Um dennoch eine Verarbeitung durch Spritztechniken zu ermöglichen, darf sich trotz der entsprechenden Verringerung des Lösemittelgehalts die Verarbeitungsviskosität möglichst nicht ändern. Dies kann entweder durch eine Erwärmung des Lackes bei der Applikation geschehen (Heißlacke) oder durch eine chemische Modifikation der Bindemittel. Als Modifikation der Bindemittel kommt eine Verminderung des mittleren Molekulargewichts der Bindemittelmoleküle in Frage, da dieses eine Viskositätsverminderung bewirkt.

Entsprechende "High-Solid-Lacke" können als Ein- oder Zwei-Komponentenlacke realisiert werden. In beiden Fällen ist die Bedeutung des chemischen Aushärtungsprozesses gegenüber den konventionellen Lacken größer. Spezielle High-Solid-2-Komponentenlacke, bei denen die Komponenten erst im Applikationsgerät gemischt werden, können so eingestellt werden, daß sie auch ohne forcierte Trocknung aushärten.

Während früher Metallic-Lacke ab 30 % Festkörpergehalt als High-Solids bezeichnet wurden und sonstige Lacke ab 80 % Festkörpergehalt, spricht man heute

- ab einem Festkörpergehalt von >70 % bei Verarbeitungsviskosität von "High-Solids" und
- ab einem Festkörpergehalt von 60-70 % bei Verarbeitungsviskosität von "Medium-Solids".

Da High-Solids eine lösemittelarme Lackierung auch temperatur empfindlicher Werkstücke erlauben (Kunststoffe), haben sie in den letzten Jahren ihren Marktanteil steigern können und es werden noch weitere Zuwächse erwartet. In ihrem Einsatzbereich stehen sie in Konkurrenz zu strahlenhärtenden Systemen (Singe 1995).

#### **A.1.1.2.3 Pulverlacke**

Für den Auftrag einer organischen Schicht auf einem Werkstück bedarf es nicht unbedingt der Applikation einer Flüssigkeit durch Versprühen. Eine Vielzahl von Bindemitteln und Farbstoffen lassen sich als Pulver elektrostatisch aufladen, so daß sie als Feststoff an zahlreichen Materialien haften. Die Ausbildung und Verfestigung des Lackfilms kann dann durch Schmelzen und physikalischem und/oder chemischen Aushärten des Bindemittels erreicht werden.

Von einigen Ausnahmen abgesehen (z.B. dem Wirbelsintern) war damit die Auftragung von Pulverlacken auch immer mit einer elektrostatischen Applikation verbunden. Diese kann zum einen durch das Anlegen einer Hochspannung zwischen der Sprühpistole und dem Werkstück erzielt werden. Zum anderen kann sie durch die Reibung des Pulvers an einer Kunststoffoberfläche entstehen. Letzteres stellt sich ein, wenn ein Pulverlack mit Pressluft durch Tefflonschläuche geschossen wird. Diese Technik wird als Tribo-Technik bezeichnet, wobei auch Kombinationen von beiden Effekten eingesetzt werden (Tribo-Plus). Durch die Tribo-Technik war es möglich, die Spannungen zwischen dem Werkstück und der Pistole zu reduzieren, was neben dem Schutz des Bedieners, der Verminderung der Gefahr von Zündfunken auch die Wirkung ungünstiger elektrostatischer Effekte am Werkstück verminderte. U.a. aus diesem Grunde hat sich der Einsatzbereich von Pulverbeschichtungen in den letzten zehn Jahren deutlich erweitert.

Neben der Minderung der Emissionen haben die Pulverlacke den Vorteil, daß nicht auf dem Werkstück abgeschiedenes Lackpulver fast vollständig zurückgewonnen werden kann. Hierdurch wurden die Kosten für Sonderabfallentsorgung und Lackmasse pro beschichteter Oberfläche deutlich reduziert.

Allerdings kann in einigen Fällen auch die Anwendung von Pulverlacken zur Emission von NMVOC führen. Neben den Emissionen, die durch den Einsatz von thermischer Energie zur Aushärtung entstehen, kann es bei der chemischen Reak-

tion der Bindemittel zur Abspaltung von Komponenten kommen, die als VOC frei werden.

#### **A.1.1.2.4 Sonstige Technologien**

Neben diesen Technologien gibt es noch eine Reihe von Spezialverfahren, die ebenfalls zur Vermeidung oder Verminderung von VOC-Emissionen führen können. Als Beispiel genannt sei nur die Anwendung von Lackfilmen, die Applikation mit CO<sub>2</sub> als Lösungsmittel oder Lacksysteme, die durch Einwirkung von Strahlen aushärten.

### **A.1.1.3 Verfahren zur Emissionsminderung**

#### **A.1.1.3.1 Adsorption**

Die Adsorption von organischen Stoffen an Festkörpern, vor allem Aktivkohle oder Aktivkoks, stellt ein konventionelles technisches Verfahren dar. Bei der Anwendung dieser Technik im Bereich der Lackieranlagen stellt sich jedoch das Problem, daß die Konzentrationen an organischen Stoffen in der Abluft meist relativ gering sind. Um trotzdem wirtschaftlich arbeiten zu können, wurden deshalb spezielle apparatetechnische Lösungen erarbeitet. Eine Ausführung davon ist das Adsorptionsrad eine andere die Wirbelschichtadsorption.

Grundsätzliches Problem der Adsorption an Aktivkohle ist die Regeneration. Diese wird in der Regel mit Dampf durchgeführt, wobei der durch die Regeneration beladene Dampf kondensiert wird. Die ursprünglich Verdampften Lösemittel fallen dann als Lösemittel-Wassergemisch an, das weiter aufgearbeitet werden muß. Überwiegend ist das Ziel dieser Aufarbeitung wiederum die Abscheidung von Wasser, damit ein möglichst heizwertreicher Abfall erhalten wird, der kostengünstig verbrannt werden kann. In Ausnahmefällen kann auch eine Rückgewinnung des Lösemittels zum Einsatz für Reinigungszwecke etc. erfolgen.

#### **A.1.1.3.2 Absorption**

Eine Entfernung von organischen Lösemitteln aus der Abluft von Lackieranlagen kann auch durch das Waschen mit Flüssigkeiten erfolgen. Entsprechend den physikalischen Eigenschaften der meisten Lösemittel bieten sich dazu hochsiedende organische Flüssigkeiten an. Nur bei wasserlöslichen Lösemitteln kann auf Wasser als Absorbens zurückgegriffen werden. Ähnlich wie bei der Adsorption besteht neben dem Problem der niedrigen Eingangskonzentration das Problem des vergleichsweise komplizierten und damit kostenintensiven Aufwands der Regeneration. Ziel ist dabei auch meist die Verbrennung der ursprünglich freigesetzten Lösemittel.

#### **A.1.1.3.3 Biologischer Abbau**

Für die Entfernung von biologisch gut abbaubaren Lösemittel können auch Biofilter eingesetzt werden. Jedoch muß die Wasserlöslichkeit des Lösemittels ausreichen, um einen ausreichenden Phasenübergang von der Abluft in die das biologische Material umgebende Wasserhülle zur erlauben. Der Einsatz von Festbettfiltern und Biowäschern ist möglich, wobei der Biowäscher für schwankende Betriebsbedingungen besser geeignet ist. Wie bei allen biologischen Vorgängen muß sichergestellt werden, daß Temperatur, Feuchte und Nährstoffzufuhr in bestimmten Grenzen gehalten werden. Nach Trocknern ist deshalb meist eine Kühlung und eine Befeuchtung nötig. Bei längerem Anlagenstillstand müssen Lösemittel als Nährstoff gezielt zugeführt werden, damit die gewünschte Flora erhalten bleibt. Zur Vermeidung der Ausbildung von anaeroben Zuständen muß eine Mindestdurchlüftung gewährleistet sein. Bei einwandfreier Führung der biologische Reinigung werden die Lösemittel zu Kohlendioxid, Wasser und ggf. andere Substanzen abgebaut.

#### **A.1.1.3.4 Verbrennung**

Zentrales Problem der Verbrennung der Lösemittel in der Abluft ist deren vergleichsweise geringe Konzentration. Die eingesetzten Konstruktionen versuchen die Wärme der Verbrennungsabgase optimal auf die lösemittelbeladene Abluft zu übertragen. Oftmals reicht aber der Heizwert der in der anfallenden Abluft enthaltenen Lösemittel nicht aus, um die Abluft auf eine Temperatur aufzuheizen, die einen Verbrennungsprozeß zuläßt. Zwar kann durch den Einsatz von Katalysatoren die Verbrennungstemperatur in manchen Fällen abgesenkt werden, jedoch läßt sich häufig der Einsatz von Stützbrennstoff nicht vermeiden. Die Abluftverbrennung führt daher nicht nur zu einer stöchiometrischen Umsetzung der Lösemittel in Kohlendioxid und Wasser, sondern auch zu zusätzlichen Emissionen dieser Stoffe durch den Hilfsbrennstoff und zur Bildung von Stickoxiden.

#### **A.1.1.4 Weiterer Untersuchungsbedarf**

Dem Umweltbundesamt liegt seit März 1995 die Untersuchung des Ingenieurbüros Lahmeyer International: "Ermittlung der Emissionssituation und fortschrittliche Emissionsminderung für "Sonstige Lackieranlagen" für bisher nicht geregelte Bereiche" vor. Diese Studie und die in ihr enthaltenen Erkenntnisse sollten einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, damit das Ziel einer 70 %igen Emissionsminderung in 10 Jahren auch erreicht werden kann.

Für den Bereich der Anschaffung von Produkten und Technische Wohnungsbau-richtlinien sollte ein Verzeichnis der Hersteller und Produkte erstellt und geführt werden, die die Anforderungen der österreichischen Lackieranlagenverordnung für

Neuanlagen heute einhalten. Dabei sollten auch die Hersteller und Produkte aus Österreich berücksichtigt werden.

Auf der Basis der Untersuchungsergebnisse von Lahmeyer International sollte ermittelt werden, in welche Höhe jeweils eine Abgabe auf bestimmte Produktgruppen erhoben werden muß, um einen Anreiz für eine Umstellungsinvestition beim Lackanwender auszulösen. Zusätzlich sind Modelle und Möglichkeiten zu konzipieren, wie die Mittel einer Lösemittelabgabe zur Förderung von Umstellungsprozessen eingesetzt werden können (Finanzierung von Beratungsleistungen, Förderprogramme, Subventionierung von Krediten etc.).

## **A.1.2 Ottokraftstoff - Verteilung**

### **A.1.2.1 Emissionsursachen**

Als Verteilung wird hier die Beförderung von der Raffinerie (bzw. dem ersten Tanklager in der BRD bei Importen) bis zum Abfüllen in den Behälter des Endverbrauchers verstanden. Erfasst werden nur die Emissionen im bestimmungsgemäßen Betrieb.

Als Ottokraftstoff werden Erdölderivate mit oder ohne Zusätze bezeichnet, deren Dampfdruck (nach Reid) mindestens 27,6 Kilopascal beträgt und die zur Verwendung als Kraftstoff bestimmt sind (EU 1994).

Ottokraftstoffe bestehen überwiegend aus einem Gemisch verschiedener Kohlenwasserstoffe, die aus Erdöl abgetrennt oder hergestellt wurden. Zur Verbesserung der Eigenschaften werden z.T. noch chemisch synthetisch hergestellte Additive, z.B. zur Unterdrückung des Selbstzündverhaltens, Verbesserung der Verbrennung oder Färbung, zugesetzt.

Die Kohlenwasserstoffe besitzen bei üblichen Umgebungstemperaturen bereits einen merklichen Dampfdruck, d.h. in einem geschlossenen Behälter mit Flüssigkeit und Luft liegen im chemischen Gleichgewicht bereits erhebliche Konzentrationen der Kohlenwasserstoffe als Gas bzw. Dampf in der Luft vor. Letzteres ist auch erforderlich, damit über einen Vergaser in den Ottomotoren ein zündfähiges Kohlenwasserstoff-Luftgemisch erzeugt werden kann. Wird die Luft-Kohlenwasserstoffdampfmischung in dem angenommenen Behälter gegen frische Luft ausgetauscht, so setzt bis zur physikalischen Gleichgewichtseinstellung eine Verdampfung der flüssigen Kohlenwasserstoffe am Boden des Behälters ein, wobei der Flüssigkeit die zur Verdampfung benötigte Energie entzogen wird. Die Dampfdrücke der Kohlenwasserstoffe im Benzin sind von der Temperatur abhängig und nehmen mit steigender Temperatur zu. Bei höheren Temperaturen des Lagerbehälters befindet sich

deshalb eine höhere Konzentration von Kohlenwasserstoffen in der Luft bzw. Gasphase.

Für die Erzeugung eines zündfähigen Dampf-Luftgemisches im Vergaser der Ottomotoren bei einem Kaltstart muß das Benzin bei Umgebungstemperaturen bereits einen ausreichenden Dampfdruck haben. Aus diesem Grunde wird die Zusammensetzung von Benzinen für den Einsatz im Sommer und im Winter unterschiedlich eingestellt. Im "Winterbenzin" werden leichtere Kohlenwasserstoffe gelöst, wie z.B. Butan, die besonders hohe Dampfdrücke haben.

Entsprechend dieser physikalischen Grundlagen entstehen VOC-Emissionen bei der Verteilung von Kohlenwasserstoffen grundsätzlich bei folgenden Vorgängen:

1. *Umfüllvorgänge* - d.h. bei festen Tanks muß aus dem befüllten Tank die Gasphase abgeleitet werden, während dem entleerten Tank Gas bzw. Luft zugeführt werden muß.
2. *Tankatmung* - d.h. durch Temperaturschwankungen dehnt sich der flüssige und gasförmige Inhalt eines Tanks aus bzw. zieht sich zusammen, weshalb bei festen Tanks ein Teil der Gasphase bei Erwärmung abgeleitet werden muß bzw. Luft oder Inertgas bei Abkühlen zugeführt werden muß.
3. *Leckagen* - an Pumpen, Ventilen, Dichtungen etc.
4. *unfallbedingten Freisetzungen*.
5. *Reinigung* - von Rohrleitungen oder Behältern.

#### **A.1.2.2 Optionen**

##### **A.1.2.2.1 Vorbemerkung**

Zur Vermeidung von VOC-Emissionen bei der Verteilung von Ottokraftstoffen kommen grundsätzlich zwei Optionen in Betracht:

1. Austausch der Dampfphase zwischen dem befüllten und dem entleerten Tank (Gaspending) und
2. Erfassung der Dampfphase und Abscheidung der Inhaltsstoffe.

##### **A.1.2.2.2 Gaspendelung**

Wird eine Flüssigkeit aus einem Tank in einen anderen Tank umgefüllt, so kann analog die Gasphase aus dem befüllten Tank in den entleerten Tank geleitet werden. Dieses als Gaspendelung bezeichnete System ist grundsätzlich denkbar einfach und bedarf meist keines zusätzlichen Antriebes, sondern nur einer zweiten Rohrleitung. Grundsätzlich ist es auch bei der Befüllung von PKW-Tanks anwendbar.

Trotzdem gibt es eine Reihe von Voraussetzungen, die die Anwendbarkeit der Gaspendelung einschränken können:

- a) Bei beiden Tanks muß es sich um feste Tanks handeln, d.h. Tanks, die ihr Volumen nicht (wesentlich) ändern.
- b) Die Rückführung der Gasphase darf zu keinem unerwünschten Stoffeintrag in dem Tank führen, aus dem die Flüssigkeit entnommen wird.
- c) Ein ausreichender Explosionsschutz muß realisierbar sein.
- d) Die Lage oder Entfernung zwischen den Tanks muß die wirtschaftliche Führung einer zweiten Rohrleitung erlauben.
- e) Der Anschluß einer zweiten Rohrleitung muß technisch.

Zu a): Zur Vermeidung von Emissionen (und den damit verbundenen Verlusten und Explosionsgefahren) sind in der Mineralölindustrie eine Reihe von Tanks mit Schwimmdächern ausgeführt. Derartige Schwimmdachtanks bestehen aus einem zylindrischen Behälter in den ein auf dem Tankinhalt schwimmendes Dach montiert ist. Der Behälter kann nach oben offen sein oder nochmals eine Abdeckung haben (internes Schwimmdach). Bei Befüllungen, Entleerungen oder Temperaturänderungen hebt oder senkt sich das Schwimmdach. Eine Gaspendelung ist deshalb nicht möglich, da es im Schwimmdachtank keine Gasphase über der Flüssigkeit geben soll. Haupteinsatzgebiet der Schwimmdachtanks ist die Lagerung von Rohölen und Mineralölprodukten in den Raffinerien oder größeren Verteilungslagern.

Zu b): Zu einer unzulässigen Kontamination bei Austausch der Gasphasen kann es aus zwei Gründen kommen:

Zum einen kann einer der beiden Tanks aus Gründen des Explosionsschutzes statt mit Dampf-Luft mit Dampf-Inertgas gefüllt sein. Das Eindringen von Luft in den mit Inertgas gefüllten Tank könnte dessen Explosionsschutz aufheben.

Zum andern können Benzine unterschiedliche zusammengesetzt sein. Zwar werden die Benzine i.d.R. in der Raffinerie weitgehend verbrauchsgerecht eingestellt, jedoch ist der Zusatz von Additiven innerhalb der Vertriebskette durchaus üblich. Auch kann es aus Handels- oder Versorgungsgründen durchaus nötig sein, eine höherwertige Sorte in einen Tank mit minderer Qualität einzufüllen. Obwohl derartige Umfüllvorgänge keine Ausnahme darstellen ist jedoch in der Regel auszuschließen, daß es über den Austausch der Gasphasen zu einer unzulässigen Kontamination kommt.

Zu c): Aus physikalischen Gründen stellt der Anschluß einer Rohrleitung an einen Behälter mit einer zündfähigen Gas-Luft-Mischung ein besonderes Explosionsrisiko dar. Um dieses Risiko zu vermindern können jedoch Flammensperren (explosions-, detonations- und dauerbrandsicher) eingesetzt werden.

Zu d): Eine Gaspendelung kommt vor allem dann nicht in Betracht, wenn Mineralölprodukte durch Fernleitungen transportiert werden.



Zu e): Eine Gaspendelung ist auch bei der Befüllung von PKW-Tanks möglich. Probleme kann allerdings wegen des nicht entsprechend konstruierten PKW-Bestands die Abdichtung am PKW-Tankstutzen verursachen. Hier Bedarf es der Kombination mit einer Absaugung und Emissionsminderungseinrichtung.

Trotz der unterschiedlichen Gründe, die eine Anwendung der Gaspendelung verhindern könnten, ist in der Praxis überwiegend nur das Problem der internen Schwimmdachtanks, der inertisierten Tanks und der Anschlußfähigkeit von PKW-Tanks von Bedeutung.

#### **A.1.2.2.3 Emissionsminderungseinrichtungen**

Zur Abscheidung von Kohlenwasserstoffen sind eine Reihe von erprobten Verfahren verfügbar. Als Beispiel seien genannt:

- a) Nachverbrennung
- b) Adsorption
- c) Membranverfahren.

Zu a): Da es sich bei den Benzenen um Treib- und Brennstoffe handelt, ist deren Zuführung zu einer Verbrennungseinrichtung meist ohne Probleme durchführbar. Lediglich die schwankende Konzentration der Benzine in der Luft bzw. Gasphase kann eine Aufkonzentration oder einen Zusatz von Hilfsbrennstoff erforderlich machen. Als Verbrennungseinrichtung sind unterschiedlichste Techniken denkbar, wobei meist eine Nutzung der dabei freiwerdenden Energie angestrebt werden. Die Verbrennungen werden deshalb nicht nur als Fackel, sondern auch als Kraftwerk, Motor etc. ausgeführt. Ist wegen der Anlagengröße keine Nutzung der freiwerdenden Energie möglich, so können katalytische Verbrennungseinrichtungen eingesetzt werden, die den Bedarf an Hilfsbrennstoff verringern oder sogar vermeiden helfen. Einsatzbereich der Nachverbrennung sind größere Anlagen, wie Tanklager mit Verladestationen etc.

Zu b): Gängigstes Adsorbens für Kohlenwasserstoffe ist Aktivkohle bzw. (billigerer) Aktivkoks. Die auf der Kohle bzw. dem Koks adsorbierten Kohlenwasserstoffe können durch Druck- oder durch Temperaturänderung desorbiert werden. Da sie i.d.R. mit Wasser wenig mischbar sind, lassen sie sich i.d.R. zurückgewinnen und zurückführen oder anderweitig einsetzen. Adsorptionsanlagen lassen sich in einem weiten Kapazitätsbereich herstellen. Als relativ kleine Einheit sind 200 l Fässer mit Adsorber im Einsatz, die von einem Dienstleister gestellt werden und nach Beladung zurückgenommen werden. Der Dienstleister regeneriert die Adsorptionsfässer, wobei die adsorbierten Benzine verwertet werden können. Das System ist daher für mittlere und kleinere Anlagen geeignet. Absorptionsanlagen sind daher für Tankstellen besonders geeignet.

Zu c) Da Kohlenwasserstoffmoleküle größer sind als die Gase, die die natürliche Zusammensetzung der Luft bilden, kann eine Rückhaltung der Kohlenwasserstoffe auch durch Membranen mit entsprechenden Porenweiten erfolgen. Da der Druckabfall an den Membranen mit der Durchströmungsgeschwindigkeit zunimmt, ist ein Einsatz dieser Technik vor allem im Bereich der Tankatmung sinnvoll.

Insgesamt ist festzuhalten, daß eine Reihe erprobter Verfahren zur Emissionsminderung zur Verfügung stehen. Da bei den meisten Fällen eine Rückgewinnung oder zumindest eine Weiterverwendung der ansonsten an die Umwelt abgegebenen Benzinmengen möglich ist, sind die Maßnahmen i.d.R. zumutbar.

#### **A.1.2.3     Weiterer Untersuchungsbedarf**

Die Umsetzung der 20. und 21. BImSchG, sowie der EU-Richtlinie sollten durch eine begleitende Untersuchung verifiziert werden. Hierbei sollte ermittelt werden, ob sich Schlupflöcher auftun, wie etwa die Reinigung von Tankfahrzeugen, die zu einer Verminderung der angestrebten Ergebnisse führen könnten.

Die Möglichkeiten und Auswirkungen einer weiteren Optimierung der Be- und Entladetechniken sollten weiter untersucht werden. Die realisierbaren Potentiale sollten dem erforderlichen Aufwand gegenübergestellt werden.

## A.2 Nichtenergiebedingtes CO<sub>2</sub>

### A.2.1 Zementherstellung

Die einzigen auswertbaren Zahlen zu den produzierten Zementmassen aus der statistischen Erhebung liegen für das Jahr 1993 vor (StaBu 1994) und sind in der folgenden Tabelle dargestellt.<sup>6</sup>

Tabelle 21: Produktion von Zement und zementähnlichen Bindemitteln in Deutschland, 1993

	Mg	Anteil
Zementklinker zum Absatz bestimmt	1.114.000	2,9 %
Portlandzement nach DIN 1164	30.304.000	80,0 %
<i>darunter zum Absatz bestimmt</i>	<i>29.842.000</i>	<i>79,0 %</i>
Eisenportlandzement	898.000	2,4 %
Hochofenzement	3.937.000	10,4 %
Sonstiger Zement	370.000	1,0 %
zementähnliche Bindemittel	1.140.000	3,0 %
Zement und zementähnliche Bindemittel insgesamt	37.763.000	100,0 %
<i>darunter zum Absatz bestimmt</i>	<i>37.301.000</i>	<i>98,8 %</i>
Quelle: StaBu 1993		

#### A.2.1.1 Emissionsursachen

Ursache der CO<sub>2</sub>-Emission im Prozeß der Zementherstellung ist die thermische Spaltung von Calciumcarbonat in Calciumoxid und Kohlendioxid:



bzw. die analoge Reaktion von Magnesiumcarbonat:



Diese Reaktion ist bei der Herstellung des Zementklinkers der Reaktion des erhaltenen Calciumoxids mit Siliciumdioxid, Aluminiumoxid oder Eisen(III)oxid vorgeschaltet, in der der eigentliche Zementklinker gebildet wird.

Nicht alles Calciumoxid wird bei dem Klinkerherstellungsprozeß umgesetzt, so daß auch freies CaO im Klinker vorhanden ist. Außer Calciumoxid kann auch Magnesiumoxid vorhanden sein, das analog reagiert.

Für die Herstellung bestimmter Zemente kann auch Calciumoxid eingesetzt werden, daß außerhalb des Zementherstellungsprozesses hergestellt wurde, d.h. in einem Kalkwerk. Dies ist bei der Abgrenzung der prozeßbezogenen Emissionen zu beachten.

<sup>6</sup> Die Daten für frühere Jahre sind wegen der Konzentration im Bereich der Zementproduktion nicht veröffentlicht. Die Daten für 1995 weisen nicht die Differenzierung auf, die für die nachfolgende Betrachtung erforderlich ist.

Tabelle 22: Chemische Reaktionen bei der Klinkerherstellung

Edukte	Produkte	Chemischer Name	Kurzbezeichnung
$3 \text{ CaO} + \text{SiO}_2$	$\rightarrow 3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Tricalciumsilikat	$\text{C}_3\text{S}$
$2 \text{ CaO} + \text{SiO}_2$	$\rightarrow 2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Dicalciumsilikat	$\text{C}_2\text{S}$
$3 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$	$\rightarrow 3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Tricalciumaluminat	$\text{C}_3\text{A}$
$4 \text{ CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\rightarrow 4 \text{ CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	Calciumaluminium-ferrit	$\text{C}_4(\text{A},\text{F})$

Zemente sind in der DIN 1164 genormt. Nach der Norm werden Zemente hinsichtlich der Einsatzstoffe bei der Herstellung, der Zusammensetzung des Fertigproduktes und der Werkstoffeigenschaften eingeteilt.

Nach DIN 1164-1 ist ein *Zement* ein anorganisches, hydraulisches Bindemittel. Bei Mischung mit Wasser erstarrt und erhärtet der Zement durch Hydratation und ist nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig. Ein Zement muß zu mindestens 50 gew % aus reaktionsfähigem<sup>7</sup> Calciumoxid und Siliciumdioxid bestehen.

Ein *Portlandzementklinker* muß nach DIN 1164-1 zu mindestens 2/3 aus Calciumsilikaten (Calciumtrisilikat oder Calciumdisilikat) bestehen. Das Masseverhältnis des Calciumoxids zum Siliciumdioxids ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) muß mindestens 2,0 betragen. Die entsprechenden Erdalkaliesilikate weisen die für Zemente typische Eigenschaft der Hydratation auf. Tricalciumsilikat erhärtet schneller als Dicalciumsilikat, wobei letzteres eine eher höhere Festigkeit liefert (Locher 1986). Bei dem Aushärtungsprozeß wird ein Teil des Calciums als Calciumhydroxyd freigesetzt, wodurch Beton alkalisch reagiert und das eingebettete Eisen vor Korrosion schützen kann.

*Hüttensand* ist gemahlene, amorphe Hochofenschlacke. Der Hüttensand für die Zementherstellung muß nach DIN 1164-1 sowohl zu mindestens 2/3 aus glasig erstarrter Schlacke bestehen, als auch zu 2/3 aus  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  und  $\text{SiO}_2$ . Das Masseverhältnis von  $\text{CaO}$  und  $\text{MgO}$  zu  $\text{SiO}_2$  muß größer als 1 sein. Hüttensand ist latent hydraulisch, d.h. er bedarf zur Auslösung seiner Aushärtung mit Wasser der Anregung, die durch Portlandzementklinker oder Calciumsulfat erfolgen kann. Die zur Herstellung von Zementen eingesetzten Hüttensande weisen (gerechnet als Oxide - bis auf Sulfid) folgende Zusammensetzung auf.

<sup>7</sup> Vgl. Definitionen in der DIN 1164-1

Tabelle 23: Benennungen und Zusammensetzung von Zementen nach DIN 1164-1

Zementart	Benennung	Kurzzeichen	Hauptbestandteile (Zur in gew. % angegebenen Zusammensetzung können für das Endprodukt noch Calciumsulfat oder Zusatzmittel hinzukommen)						
			Portlandzementklinker	Hütten-sand	natürliches Puzzolan	kieselsäure-reiche Flugasche	Kalkstein	gebrannter Schiefer	Nebenbestandteile
CEM I	Portlandzement	CEM I	95 bis 100	-	-	-	-	-	0 bis 5
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80 bis 94	6 bis 20	-	-	-	-	0 bis 5
		CEM II/B-S	80 bis 94	21 bis 35	-	-	-	-	0 bis 5
	Portlandpuzzolan-zement	CEM II/A-P	80 bis 94	-	6 bis 20	-	-	-	0 bis 5
		CEM II/B-P	65 bis 79	-	21 bis 35	-	-	-	0 bis 5
	Portlandflugasche-zement	CEM II/A-V	80 bis 94	-	-	6 bis 20	-	-	0 bis 5
	Portlandölschiefer-zement	CEM II/A-T	80 bis 94	-	-	-	6 bis 20	-	0 bis 5
		CEM II/B-T	65 bis 79	-	-	-	21 bis 35	-	0 bis 5
	Portlandkalkstein-zement	CEM II/A-L	80 bis 94	-	-	-	-	6 bis 20	0 bis 5
	Portlandflugaschehütten-zement	CEM II/B-SV	65 bis 79	10 bis 20	-	10 bis 20	-	-	0 bis 5
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35 bis 64	36 bis 65	-	-	-	-	0 bis 5
		CEM III/B	20 bis 34	66 bis 80	-	-	-	-	0 bis 5

*Puzzolane* sind natürliche oder industrielle Stoffe, die aus Kieselsäuren oder Aluminiumoxiden bestehen. Nach DIN 1164-1 muß der Masseanteil an reaktionsfähigen  $\text{SiO}_2$  mindestens 25 % betragen. Natürliche Puzzolane werden aus Vulkangestein gewonnen, wie z.B. der in Deutschland vorkommende Traß. Puzzolane erhärten mit Wasser nur unter Zusatz von Calciumoxid bzw. Magnesiumoxid.

Natürliche Puzzolane weisen die in der folgenden Tabelle gezeigte Zusammensetzung auf.

Tabelle 24: Zusammensetzung von Hüttensanden für die Zementherstellung

Bestandteil als Oxid (bis auf S)	Gew.- %	
	von	bis
CaO	34,0	46,0
SiO <sub>2</sub>	30,0	43,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,0	18,0
TiO <sub>2</sub>	0,3	1,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	1,0
MgO	2,0	13,0
Na <sub>2</sub> O	0,3	1,2
K <sub>2</sub> O	0,4	1,3
S <sup>2</sup>	0,5	1,8
Quelle: Locher (1986)		

Tabelle 25: Zusammensetzung von natürlichen Puzzolanen, gerechnet als Oxide

Bestandteil als Oxid	Puzzolane Gew.- %		Traß Gew.- %	
	von	bis	von	bis
CaO	1	15	3	6
SiO <sub>2</sub>	45	75	50	60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	20	17	19
TiO <sub>2</sub>	0,5	1,0		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	12	3	5
MgO	0,2	4		
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	1	10	6	10
Quellen: Locher (1986), Knoblauch (1995)				

*Flugaschen* fallen bei der Entstaubung von Rauchgasen in Verbrennungsanlagen an. Ihre Zusammensetzung ist u.a. von dem Brennstoff, der Verbrennungstemperatur und den ggf. zur Rauchgasreinigung eingesetzten Stoffen abhängig. Als *kiesel-säurereiche Flugasche* werden nach DIN 1164-1 nur die Flugaschen bezeichnet, die einen Masseanteil von mindestens 25 % reaktionsfähigem SiO<sub>2</sub> aufweisen und deren Gehalt an reaktionsfähigem Calciumoxid kleiner 5 % ist. Aufgrund der großen Anzahl der unerwünschten Begleitstoffe muß Flugasche ständig kontrolliert und überwacht werden (Knoblauch 1995). Nachteilig ist auch, daß sie überwiegend im Winter anfällt, Zement aber eher im Frühjahr und Sommer benötigt wird (Borgholm 1992).

*Gebrannter Schiefer* wird durch das Brennen von Ölschiefern gewonnen. Er enthält Dicalciumsilikat und Calciumaluminat, sowie andere puzzolanisch wirkende Stoffe. Für die erforderliche Druckfestigkeit und das Dehnungsmaß gelten nach DIN EN 196-1 und DIN EN 196-3 von den sonstigen Zementen abweichende Bestimmungen.

Der Statistik ist zu entnehmen, daß der Portlandzement an den Zementprodukten einen Anteil von ca. 80 % hat. Von Bedeutung sind daneben noch der Hochofenzement

ment mit ca. 10 %, sowie der Eisenportlandzement mit ca. 2,5 %, die nunmehr als Portlandhüttenzement und Hochofenzement bezeichnet werden, und sonstige zementähnliche Bindemittel mit ca. 3 %.

Die drei erstgenannten Materialien sind daher für eine Ursachenbetrachtung von Bedeutung. Zusätzlich sollen die Portlandpuzzolanzemente betrachtet werden.

#### A.2.1.1.1 Portlandzement

Portlandzementklinker besteht aus den in der folgenden Tabelle gezeigten Komponenten.

Tabelle 26: Bestandteile von Portlandzementklinker

Tricalciumsilikat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Dicalciumsilikat	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Tricalciumaluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Calciumaluminiumferrit	$2 \text{ CaO} (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$
freies Calciumoxid	$\text{CaO}$
freies Magnesiumoxid	$\text{MgO}$

Zur Bandbreite der Zusammensetzung des Rohmaterials liegen folgende Informationen vor.

Tabelle 27: Zusammensetzung des Rohmaterials für Portlandzementklinker

	Formel	Anteil in Gew- %		
		minimal	mittel	maximal
Calciumoxid	$\text{CaO}$	63	66	68
Siliciumdioxid	$\text{SiO}_2$	20	21,5	23
Aluminiumoxid	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,5	5,5	6,5
Eisen(III)oxid	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1	3	5

Quelle: Locher (1986)

Das Calciumoxid wird natürlich nicht als solches eingesetzt, sondern im Brennprozeß aus eingesetztem Calciumcarbonat gebildet. Entsprechend ergeben sich folgende Bandbreiten für den Anteil des Calciumcarbonats am trockenen Rohmehl und  $\text{CO}_2$ -Emissionen pro Tonne Klinker.

Tabelle 28: Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative  $\text{CO}_2$ -Massen bei der Herstellung von Portlandzementklinker

		minimal	mittel	maximal
		Anteil in Gew- %		
Calciumcarbonat	$\text{CaCO}_3$	75,0	77,6	79,0
		kg $\text{CO}_2$ pro Mg Portlandzementklinker		
Kohlendioxid	$\text{CO}_2$	495	519	534

Der Anteil des maximal umsetzbaren Calciumoxids ergibt sich nach folgender Formel ( $w$  in Gew.-%).

$$w_{CaO_{max}} = 2,80 \cdot w_{SiO_2} + 1,18 \cdot w_{Al_2O_3} + 0,65 w_{Fe_2O_3}$$

Wird mehr Calciumoxid bzw. Calciumcarbonat eingesetzt, so verbleibt freies Calciumoxid im Zement (Locher 1986).

Der Wert des Umweltbundesamtes von 565 kg CO<sub>2</sub> pro t Portlandzementklinker erscheint insofern ein wenig zu hoch gegriffen. Im Folgenden wird daher von 520 kg pro t Portlandzementklinker ausgegangen. Da Portlandzement bis zu 95 % aus Portlandzementklinker bestehen kann (ca. 5 % Calciumsulfat und Füller unterstellt) und der Magnesiumanteil nicht näher berücksichtigt werden soll, kann der Wert auch für den Portlandzement angesetzt werden.

#### A.2.1.1.2 Portlandhüttenzement

Portlandhüttenzemente sind Mischungen aus Portlandzementklinker und Hüttensand. Hüttensand ist mit Wasser und Preßluft abgeschreckte, amorphe Hochofenschlacke. Hochofenschlacke entsteht bei der Herstellung von Roheisen im Hochofen. Hierbei wird dem Erz Calciumoxid zugegeben, um Verunreinigungen von Gangart, die überwiegend aus Aluminium- und Siliciumoxiden besteht, zu entfernen. Der gemahlene Hüttensand ist latenthdraulisch, d.h. er bindet nur durch Zusatz von anregenden Substanzen ab. Derartige Substanzen sind Portlandzementklinker oder Calciumsulfate (Gips).

Wegen des geringeren Kalkgehaltes sind die ausgehärteten Zemente mit Anteilen von Hüttensand chemisch stabiler als reiner Portlandzement. Die bei der Aushärtung gebildete Hydratationswärme ist bei diesen Zementen geringer, als beim Portlandzement, weshalb die Zemente bei Bauwerken eingesetzt werden, bei denen Störungen durch Wärmeausdehnung vermieden werden muß (Talsperren, Tunnelbau etc.).

Für die Portlandhüttenzemente ergeben sich nach DIN 1164-1 folgende Werte.

Tabelle 29: Theoretischer Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative CO<sub>2</sub>-Massen bei der Herstellung von Portlandhüttenzementen

Portlandhüttenzement		CEM II/A-S		CEM II/B-S	
		Anteil in Gew.- %			
Portlandzementklinker		80	94	65	79
Hüttensand		20	6	35	21
Calciumcarbonat    CaCO <sub>3</sub>		Einsatz in kg			
		946	1.111	768	934
		kg CO <sub>2</sub> pro Mg Portlandhüttenzement			
		minimal	maximal	minimal	maximal
Kohlendioxid        CO <sub>2</sub>		468	505	430	466
Zusätzliches CO <sub>2</sub>		416	489	338	411



Bei der Herstellung von Portlandhüttenzement CEM II/A-S werden pro Mg im Mittel ca. 490 kg CO<sub>2</sub> frei. Bei der Herstellung von Portlandhüttenzement CEM II/B-S werden pro Mg im Mittel ca. 450 kg CO<sub>2</sub> frei.

Hierbei ist zu beachten, daß die CO<sub>2</sub>-Massen, die bei der Herstellung des Hüttensandes frei werden, auch der Roheisenerzeugung zugeordnet werden können. Da im Gesamtemissionsmodell dies geschehen sein sollte, sind nur die Werte in der letzten Zeile ausschlaggebend. Demnach ist für Portlandhüttenzement CEM II/A-S pro Mg im Mittel mit einer zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emission von 450 kg und für CEM II/B-S von 375 kg zu rechnen.

#### A.2.1.1.3 Portlandpuzzolanzemente

Als natürliches Puzzolan wird in Deutschland Traß zur Zementherstellung eingesetzt. Unter der Annahme, daß bei der Gewinnung und Aufbereitung des Traß nur relativ geringe prozeßbedingte CO<sub>2</sub>-Massen frei werden, ergeben sich folgende Werte für Portlandpuzzolanzemente.

Tabelle 30: Theoretischer Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative CO<sub>2</sub>-Massen bei der Herstellung von Portlandpuzzolanzemente

Portlandpuzzolanzemente		CEM II/A-P		CEM II/B-P	
		Anteil in Gew.- %			
Portlandzementklinker		80	94	65	79
Puzzolan		6	20	21	35
Calciumcarbonat    CaCO <sub>3</sub>		Einsatz in kg			
		945	1.111	768	934
Kohlendioxid    CO <sub>2</sub>		kg CO <sub>2</sub> pro Mg Portlandhüttenzement			
		minimal		maximal	
		416		489	
				338	411

Für die Herstellung von Portlandpuzzolanzement CEM II/A-P ist pro Mg im Mittel eine prozeßbedingte CO<sub>2</sub>-Emission von 450 kg und für CEM II/B-P von 375 kg zu unterstellen.

#### A.2.1.1.4 Hochofenzement

Bei der Herstellung von Hochofenzementen werden die gleichen Grundstoffe wie beim Portlandhüttenzement eingesetzt. Aufgrund der anderen Zusammensetzung ergeben sich folgende Werte.

Tabelle 31: Theoretischer Anteil des Calciumcarbonats am Rohmehl und freigesetzte relative CO<sub>2</sub>-Massen bei der Herstellung von Hochofenzementen

Hochofenzemente		CEM III/A		CEM III/B	
		Anteil in Gew.- %			
Portlandzementklinker		35	64	20	34
Hüttensand		64	36	80	66
Einsatz in kg					
Calciumcarbonat	CaCO <sub>3</sub>	414	757	237	402
kg CO <sub>2</sub> pro Mg Portlandhüttenzement					
		minimal	maximal	minimal	maximal
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	350	427	314	350
Zusätzliches CO <sub>2</sub>		182	333	104	177

Bei der Herstellung von Hochofenzementen werden bei CEM III/A im Mittel ca. 390 kg CO<sub>2</sub> frei und bei CEM III/B ca. 335 kg.

Berücksichtigt man die bei der Herstellung des Hüttensandes freigewordenen Massen nicht, so werden bei der Herstellung von 1 Mg CEM III/A im Mittel ca. 260 kg CO<sub>2</sub> prozeßbedingt frei und bei 1 Mg CEM III/B ca. 140 kg.

#### A.2.1.1.5 Vergleich der Zementarten

Bei einem Vergleich der Daten zu den Zementarten und der Anwendung dieser Daten auf das Ergebnis der statistischen Erhebung für 1993 ergeben sich folgende Werte.

Tabelle 32: Nichtenergiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen für 1993 bei Berücksichtigung der verschiedenen Zementarten

	Produktion	CO <sub>2</sub>	zus. CO <sub>2</sub>
	Mg	Mg	Mg
Zementklinker zum Absatz bestimmt	1.114.000	579.280	579.280
Portlandzement nach DIN 1164	30.304.000	15.758.080	15.758.080
darunter zum Absatz bestimmt	29.842.000	15.517.840	15.517.840
Eisenportlandzement	898.000	422.060	370.425
Hochofenzement	3.937.000	1.427.163	787.400
Sonstiger Zement	370.000	152.625	152.625
zementähnliche Bindemittel	1.140.000	470.250	470.250
Zement und zementähnliche Bindemittel insgesamt	37.763.000	18.809.458	18.118.060
darunter zum Absatz bestimmt	37.301.000	18.569.218	17.877.820
Emissionsfaktoren		kg CO <sub>2</sub> /Mg	kg CO <sub>2</sub> /Mg
Portlandzement	CEM I	520	520
Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	490	450
Portlandhüttenzement	CEM II/B-S	450	375
Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	450	450
Portlandpuzzolanzement	CEM II/B-P	375	375
Hochofenzement	CEM III/A	390	260
Hochofenzement	CEM III/B	335	140

Bei der Berechnung wurden die arithmetischen Mittel der Werte für die Zementarten eingesetzt, um sie mit den statistischen Daten verrechnen zu können. Für "sonstiger Zement" und "zementähnliche Bindemittel" wurde der Mittelwert für die Traßzemente eingesetzt.

Die nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emission bei der Zementherstellung betrug danach 1993 ca. 18,5 Mio. Mg, wobei ca. 18 Mio. Mg zusätzliche Emissionen sind, d.h. ca. 0,5 Mio. Mg dürften schon bei der Roheisenherstellung erfaßt sein.

### **A.2.1.2 Optionen**

#### **A.2.1.2.1 Produktvermeidung**

Erste zu betrachtende Option, ist der Ersatz von Zementklinker durch andere Materialien.

Bei Hochbau besteht die Option, statt Stahlbeton Steine einzusetzen, bei deren Herstellung kein Kalkstein eingesetzt wurde, oder auf gänzlich andere Materialien (z.B. Holz) auszuweichen. Eingeeengt wird diese Möglichkeit selbstverständlich durch die entsprechenden konstruktiven Anforderungen.

Im Tiefbau stellt sich primär die Frage, ob der Beton als Fahrbahnmaterial nicht auch durch Asphalte ersetzt werden kann.

#### **A.2.1.2.2 Ersatz des Portlandzementes durch andere Zemente**

Die Zusammenstellung der Emissionsfaktoren zeigt, daß der am meisten hergestellte Portlandzement CEM I den ungünstigsten Emissionsfaktor hat. Es liegt damit auf der Hand, daß ein Ersatz von Portlandzementklinker durch Hüttensand, natürliche oder künstliche Puzzolane zu einer Verminderung der prozeßbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie führt (Schmidt 1992a).

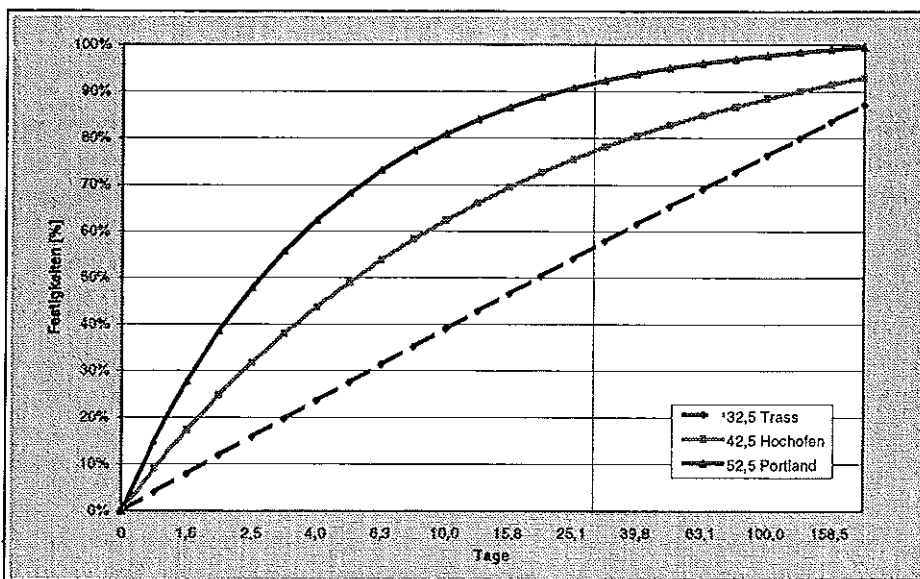
Eine Umstellung ist jedoch nicht uneingeschränkt möglich, da die verschiedenen Zemente unterschiedliche Eigenschaften u.a. bzgl. Festigkeit, Aushärtungsverhalten und chemischer Beständigkeit haben.

Primär ist zu beachten, daß Portandzemente am schnellsten die höchsten Druckfestigkeitswerte erreichen.

Für die Einstufung der Zemente ist nach DIN 1164-1 die Druckfestigkeit nach 2, 7 und 28 Tagen entscheidend. Der Wert von 28 Tagen ist den Anforderungen der modernen Bautechnik, mit schnellem Baufortschritt und teurem Schalmaterial, angepaßt.

Zemente mit hohem Anteil an schnell aushärtendem Calciumtrisilikat, wie Portlandzemente, haben nach 28 Tagen bereits einen hohen Teil ihrer Endfestigkeit erreicht. Sie werden daher in eine hohe Festigkeitsklasse eingestuft. Andere Zemente haben nach 28 Tagen erst einen geringeren Teil ihrer Endfestigkeit erreicht und benötigen zum Aushärten u.U. ein Jahr oder länger. Sie werden deshalb in die niedrigen Festigkeitsklassen eingestuft, auch wenn die Endfestigkeit sich nur geringfügig von den Zementen hoher Festigkeitsklassen unterscheidet (Knoblauch 1995). Ihr Einsatz kann deshalb durchaus zu den gleichen Zwecken wie Portlandzemente erfolgen, nur Bedarf es dazu spezieller Vereinbarungen, die von der DIN 1164-1 abweichende Regelungen festlegen (vgl. Friede 1986).

Abbildung 8: Druckfestigkeit und Abbindungsgeschwindigkeit verschiedener Zemente (schematisch)



Neben der Frage der Druckfestigkeit ergeben sich auch relevante Unterschiede bei anderen Anwendungseigenschaften, die hier nicht im einzelnen diskutiert werden können, sondern allenfalls im Rahmen einer speziellen Untersuchung abgehandelt werden könnten.

Als Nachteil des Einsatzes von Hüttensand zur Zementherstellung wird angeführt, daß der Energieeinsatz für das Mahlen des Hüttensandes höher sei, als der für das Mahlen des Portlandzementklinkers.

Tabelle 33: Bedarf an elektrischer Energie für das Mahlen von Portlandzementklinker und Hüttensand

	Portlandzementklinker		Hüttensand	
	kWh/Mg	MJ/Mg	kWh/Mg	MJ/Mg
Rohmehlmahlung	15	54		
Hüttensandherstellung			122	440
Klinkermahlung	100	360		
Hüttensandmahlung			210	756

Quelle: Merten (1995)

Gründe hierfür können sein, daß der Hüttensand härter als der Klinker ist feiner gemahlen werden muß. Von andere Seite (Patzelt 1992) wird jedoch für die Mahlung des Hüttensandes in Rohrmühlen ein Energiebedarf von 70 bis 75 kWh/Mg (250 bis 270 MJ/Mg) genannt, der bei Einsatz spezieller Walzenmühlen (Gutbettmühlen) sich bis auf 45 bis 60 kWh/Mg (160 bis 216 MJ/Mg) reduzieren läßt. In einer Anlage mit einem Bedarf von 52 kWh/Mg (187 MJ/Mg) wird der Hüttensand bis 4.700 cm<sup>2</sup>/g aufgemahlen. Die Unterschiede der Werte beider Quellen können im Rahmen dieser Studie nicht aufgeklärt werden, jedoch wird deutlich, daß sich offensichtlich der Energiebedarf bei der Mahlung von Hüttensand technisch deutlich reduzieren läßt, so daß das Problem an Bedeutung verlieren könnte.

Vorteil der anderen Materialien ist es, daß sie nicht mehr gebrannt werden müssen. I.d.R. sind nur Abbau, Brechen, Trocknen, Sichten, Mahlen, Mischen und Lagern erforderlich. Daher können auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Einsatz thermischer Energie geringer sein, sowie die mit der Energiebereitstellung verbundenen sonstigen Luftverunreinigungen.

Fraglich ist hingegen wiederum ihre Verfügbarkeit. Im Gegensatz zu Kalkstein sind die Traßlagerstätten in Deutschland auf wenige Standorte beschränkt und Hochofenschlacke fällt auch nur an wenigen Standorten an. Insofern kann der verstärkte Einsatz von Hüttensand und natürlichen Puzzolanen zu verstärkten Transportströmen führen.

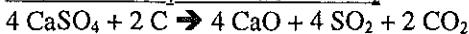
#### A.2.1.2.3 Wahl anderer Rohstoffe zur Klinkerherstellung

Das Recycling von Abbruchbeton beschränkt sich (soweit im Rahmen dieser Studie ermittelbar) bislang auf die Verwertung als Betonzuschlagstoff. In Zusammenhang mit Strategien zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in der Zementindustrie stellt sich aber die Frage, ob Abbruchbeton nicht auch als Rohmehl für die Zementindustrie eingesetzt werden könnte. Zwar würde der Abbruchbeton zum größten Teil einen Siliciumträger darstellen, jedoch könnte der enthaltene Anteil an Calciumhydroxyd und Calciumsilikaten zurückgewonnen werden.

Für diese Option wäre eine Abschätzung der Realisierbarkeit, des Aufwandes und des möglichen Nutzens erforderlich.

#### A.2.1.2.4 Einsatz des Müller-Kühne-Prozess

Als Rohstoff für Zementklinker kann nicht nur Calciumcarbonat, sondern auch Calciumsulfat eingesetzt werden. Bei dem sog. Müller-Kühne-Prozeß wird die Herstellung von Zement und Schwefelsäure gekoppelt. Das eingesetzte Calcium Sulfat (Gips bzw. Anhydrit) wird reduktiv thermisch gespalten und zu Calciumoxid und Schwefeldioxid umgesetzt:



Das erhaltene Schwefeldioxid wird katalytisch zu Schwefeltrioxid oxidiert und zu Schwefelsäure verarbeitet. Die auf den Schwefel bezogene Ausbeute beträgt dabei 85 % (Anlagen auf Basis elementarem Schwefel haben eine Ausbeute von >99 %). Das erhaltene Calciumoxid wird in den Zementklinker eingebunden.

Der reduktiv thermische Prozeß wird in einem ca. 70 m langen Drehrohr durchgeführt. Zur Reduktion eines Viertel des Calciumsulfats wird Koksstaub dem Rohmehl beigemischt. Hierbei muß ca. 20 % mehr Kohlenstoff zu gegeben werden, als stöchiometrisch erforderlich. Die Zusammensetzung des Rohmehls vom Drehrohrofens sowie des Rohgases, welches das Drehrohr verläßt, sind in den folgenden beiden Tabellen zusammengestellt.

Tabelle 34: Material und Energieeinsatz zur Herstellung von Portlandzementklinker nach dem Müller-Kühne-Prozess

Material für 1 Mg Klinker	von	bis	
	Mg		
Calciumsulfat (als Anhydrit)	1,6	1,7	(ca. 2,2 Mg Gips)
Ton (Aluminiumoxid)	0,2	0,7	
Sand (Siliciumdioxid)	0,1	0,1	
Koksstaub (Kohlenstoff)	0,1	0,1	
	MJ	MJ	
thermische Energie	9.600	11.700	incl. Materialvorbereitung
Quelle: Müller (1994)			

Tabelle 35: Zusammensetzung des Rohgases aus dem Müller-Kühne-Prozess

Stoff	von	bis
	Vol %	
SO <sub>2</sub>	7	10
O <sub>2</sub>	0,7	1,6
CO <sub>2</sub>	15	20
H <sub>2</sub> O	23	23

Das Rohgas muß vorgereinigt werden, bevor es in einer Schwefelsäureanlage eingesetzt werden kann. Der erhaltene Klinker entspricht dem, der für hochwertigen Portlandzement eingesetzt wird.

Pro Mg Zementklinker werden nach dem Müller-Kühne-Prozeß 280 kg CO<sub>2</sub> aufgrund des chemischen Reaktionen des Herstellungsprozesses freigesetzt.

Der Müller-Kühne-Prozeß hat technisch und ökonomisch eine Reihe von Nachteilen. Zum Erhalt brauchbarer und hochwertiger Produkte muß die Zusammensetzung des Rohmaterials genau eingehalten werden. Die Zementherstellung muß mit der Schwefelsäure gekoppelt gefahren werden, wodurch Probleme beim An- oder Abfahren eines Anlagenteils entstehen können. Ökonomisch nachteilig sind die Investitionskosten (das Fünffache einer Schwefelsäureanlage auf der Basis von Flüssigschwefel), die hohen Betriebskosten durch den hohen Brennstoffbedarf und die schwierigen Absatzmöglichkeiten für Schwefelsäure.

Ökologisch problematisch ist der hohe Energieeinsatz und die niedrige Ausbeute beim Schwefel, d.h. die hohen Schwefeldioxidemissionen pro Mg Schwefelsäure. Da der Einsparung von prozeßbedingtem CO<sub>2</sub> (ca. 240 kg/Mg) eine höhere energiebedingte CO<sub>2</sub>-Freisetzung (ca. 1 Mg/Mg) gegenübersteht, ist zweifelhaft, ob der Müller-Kühne-Prozeß CO<sub>2</sub>-Einsparungen erbringen kann. Diese wären nur bei einer deutlichen Reduktion des Energieeinsatzes möglich.

### **A.2.1.3 Weiterer Untersuchungsbedarf**

#### **A.2.1.3.1 Ersatz von Portlandzementklinker nach derzeitigem Stand der Technik**

Vor der konkreten Diskussion eines Ersatzes von Portlandzement durch andere Zementarten sind eine Reihe von Fragestellungen zu klären.

Zunächst ist zu untersuchen, ob ein entsprechender Ersatz auf Grund der Stoffbilanz überhaupt möglich ist und welche Umweltauswirkungen er auslöst. Grundsätzlich ist zu klären, ob die möglichen Ersatzmaterialien überhaupt in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Natürliche Puzzolane stehen nur in wenigen Lagerstätten zur Verfügung. Aufgrund der ständig zurückgehenden Produktion von Roheisen ist nicht sicher, daß dauerhaft überhaupt genügend geeignete, basische Hochofenschlacke zur Verfügung stehen wird. Insofern müssen alle genannten Zementarten in ein mögliches Ersatzkonzept eingebunden werden.

Art und Höhe des Energieeinsatzes bei der Zementherstellung wird sich bei Einsatz von Ersatzmaterialien verschieben, d.h. der Einsatz an thermischer Energie wird zurückgehen, da der Hüttensand nicht mehr gebrannt werden muß, hingegen muß der

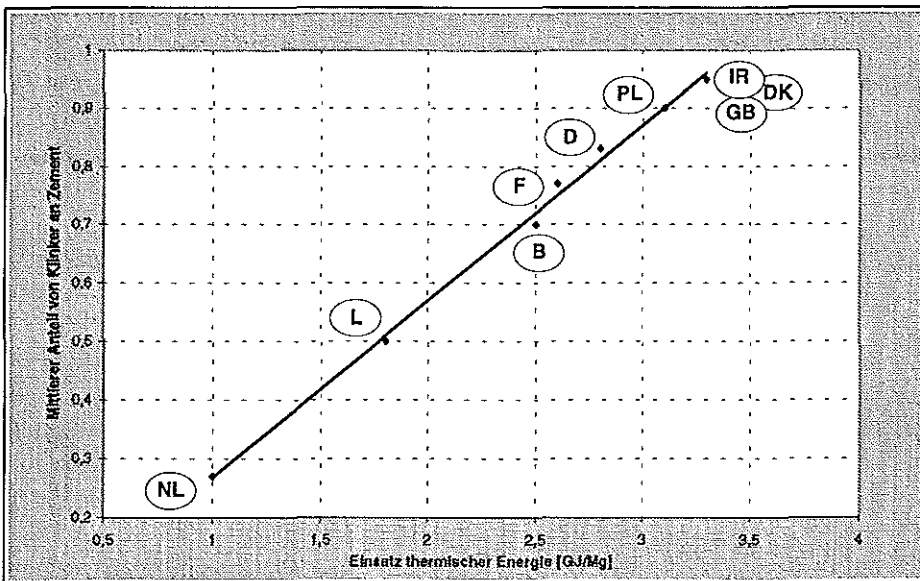
Hüttensand besonders fein gemahlen werden, weshalb mehr elektrische Energie eingesetzt werden muß.

Traß, Hüttensand und andere Stoffe sind nur an bestimmten Herstellungs- und Lagerstätten verfügbar. Es ist daher zu untersuchen, welche Transportströme ausgelöst würden, wenn auf derartige Materialien verstärkt zurückgegriffen würde.

Darüber hinaus ergäben sich durch den Ersatz Auswirkungen auf die Auslastung der Drehrohröfen und Nebeneinrichtungen der Zementwerke. Die von den Zementwerken angestrebte hohe Auslastung der entsprechenden Investitionen könnte nicht mehr erfolgen, statt dessen wären neue Investitionen in Mahl-, Lager- und Mischanlagen erforderlich. Die möglichen Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt wären ebenfalls zu prüfen.

Weiterhin ist zu untersuchen, wie ausländische Zementanbieter auf Maßnahmen reagieren könnten. Hierbei ist zu beachten, daß Zemente mit niedrigem Klinkeranteil in anderen EU-Staaten weiter verbreitet sind als in Deutschland und die entsprechende Umstellung insofern nur eine Anpassung des Angebots darstellt (Worrell 1994).

Abbildung 9: Klinkeranteil am Zement und Einsatz thermischer Energie bei der Zementherstellung in verschiedenen EU-Staaten



Quelle: Worrell (1994)

Unter den möglichen Anbietern in Deutschland ist Polen der einzige Staat, in dem Zement durchschnittlich mit einem höheren Anteil an Klinker hergestellt wird, als in Deutschland.



#### **A.2.1.3.2 Weitergehender Ersatz von Portlandzementklinker**

Nach den Annahmen von Schmidt (1992b), können nur Zemente mit niedrigen Festigkeitswerten ( $32,5 \text{ N/mm}^2$  nach 28 d) durch Zemente mit niedrigem Portlandzementklinkeranteil hergestellt werden. Es wäre zu untersuchen, ob diese Einschränkung tatsächlich in vollem Umfang zutrifft. Einerseits bestehen Möglichkeiten, z.B. durch feinere Aufmahlung, auch bei anderen puzzolanisch wirkenden Stoffen höhere Festigkeiten zu bewirken. Andererseits ist in der Praxis nicht der Festigkeitswert des Zementes entscheidend, sondern der des Betons, sowie nicht unbedingt der Wert nach 28 d.

Insofern ist einerseits zu untersuchen, ob durch technische Verbesserungen die Bedingungen der DIN 1164-1 für Zemente mit hohen Festigkeitsanforderungen nicht auch von Zementen mit niedrigem Portlandklinkeranteil erfüllt werden können. Andererseits ist zu untersuchen, ob derartige Zemente nicht auch durch Abweichungen von der DIN 1164-1 und deren Anwendung eingesetzt werden können, ohne daß die Qualität des schließlich hergestellten Betons darunter leidet.

Auch bei der Untersuchung des weitergehenden Ersatzes ist zu beachten, daß jegliche Reduktion der Klinkerherstellung Auswirkungen auf die Investitionen der Zementhersteller hat, sowie den Arbeitsmarkt günstig oder ungünstig beeinflussen kann. Zusätzlich ist eine mögliche Reaktion der Zementanbieter aus dem Ausland zu beachten.

#### **A.2.1.3.3 Einsatz von Abbruchbeton als Rohmehl**

Die Option eines möglichen Einsatzes von Abbruchbeton zur Rohmehlherstellung wird vor der weiteren Diskussion der Erstellung einer ersten Ideenskizze bedürfen, in der alle möglichen relevanten Begleit Aspekte identifiziert und vorgeprüft werden.

#### **A.2.1.3.4 Einsatzmöglichkeiten des Müller-Kühne-Prozess**

Der Müller-Kühne-Prozeß war die einzige, im Rahmen dieser Studie festgestellte Option einen Portlandzementklinker herzustellen, ohne hohe prozeßchemische  $\text{CO}_2$  Emissionen zu verursachen. Nach den vorliegenden Daten ist diese Option aber wg. der sonstigen ökologischen und ökonomischen Eigenschaften keine empfehlenswerte Alternative. Bevor diese Option jedoch endgültig aus der weiteren Betrachtung ausscheidet, sollte das Potential zur einer ökologischen und ökonomischen Optimierung des Müller-Kühne-Prozesses genauer geprüft werden, als dies im Rahmen dieser Studie möglich ist.

## A.2.2 Primäraluminium

### A.2.2.1 Emissionsursachen

Das Bauxiterz wird mit Natronlauge aufgeschlossen, wobei unlösliche Oxide ausfallen und den sog. Rotschlamm bilden. Das gelöste Aluminiumhydroxid wird getrocknet und geglüht, bevor es als Aluminiumoxid in der Elektrolyse eingesetzt werden.

In der Elektrolyse wird Aluminiumoxid elektrisch in Aluminium und Sauerstoff gespalten. Der entstehende Sauerstoff oxidiert die Kohleanode, wodurch hauptsächlich Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) frei wird.

Als Anoden werden entweder vorgesinterte Kohleelektroden (prebacked anodes) eingesetzt, die i.d.R. aus Petrolkoks hergestellt werden, oder es werden im Prozeß sinternde Elektroden (Söderberg-Anoden) eingesetzt. Leider wird bei der Angabe von Emissionsdaten und Emissionsfaktoren nicht immer zwischen den Anodenarten differenziert bzw. angegeben, welcher Anodentyp der Messung zu Grunde lag.

Bei der Bilanzierung der Kohlendioxidemissionen ist jedoch der Unterschied zwischen beiden Elektroden wesentlich, da Unterschiede in den Emissionen der Elektrolyse und der Produktionsvorstufe Anodenherstellung entstehen. Bei Einsatz der Söderberg-Anoden müßte ein höherer Masserverlust in der Elektrolyse (kg Anode/Mg Al) vorliegen, während der Masseverlust in der Anodenherstellung (Mg Rohmaterial/Mg Anode) geringer sein müßte. Bei der vorgesinterten Anode müßte der Masseverlust in der Elektrolyse (kg Anode/Mg Al) geringer sein, während der Masseverlust bei der Anodenherstellung (Mg Rohmaterial/Mg Anode) höher sein müßte. Je nach Prozeß (Elektrolyse oder Anodenherstellung) wird Menge und Zusammensetzung der Abgase (Kohlenoxide und Kohlenwasserstoffe), sowie Art der Abgasreinigung unterschiedlich sein, was bei einer Gesamtbilanz bei der Prozessstufen zu beachten wäre.

Für den Masseverlust der Anode wird generell ein Wert von 400 bis 500 kg/Mg Aluminium und für die Kathode von 20 bis 40 kg/Mg Aluminium angegeben (Frank 1985). Bei der Reaktion des Sauerstoffs mit der Anode entsteht nicht nur Kohlendioxid, sondern auch Kohlenmonoxid (Büchner 1984). Entsprechend der an der Anode vorherrschenden Temperatur (950-1000°C) müßte aus thermodynamischen Gründen sogar zu 99 % Kohlenmonoxid entstehen. Daß trotzdem überwiegend Kohlendioxid entsteht, wird auf die unterschiedlichen Adsorptionseigenschaften des Kohlenmonoxids und Kohlendioxids an der Kohleanode erklärt. Da das primär gebildete Kohlenmonoxid erheblich langsamer desorbiert als Kohlendioxid, wird es überwiegend vor der Desorption oxidiert (Frank 1985).

Bei Einsetzen des Anodeneffektes nimmt jedoch der Anteil an Kohlenmonoxid stark zu. Es ergeben sich dann folgende Gaszusammensetzungen.

Als Ursache des Anodeneffekts wird eine unzureichende Benetzung der Anode durch die Abscheidung von Reaktionsprodukten des in der Schmelze enthaltenen Fluorids angesehen (Frank 1985). Ein Auftreten des Anoden-Effekts einmal in fünf Betriebstagen einer Zelle wird als gering bezeichnet (Qui Zhuxian 1995).

Tabelle 36: Zusammensetzung der Elektrolysegase bei Anoden-Effekt

Gas	Söderberg-Anoden		vorgesinterte Anoden	
	von	bis	von	bis
	Vol %			
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	20	20	20	20
Kohlenmonoxid CO	65	65	65	65
Kohlenstofftetrafluorid CF <sub>4</sub>	7	24	15	24,5
Ethanhexafluorid C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0,3	0,5	1,5	7
Quelle: Rawlek (1996a)				

Für den Dauerbetrieb der Aluminium-Elektrolyse werden folgende Emissionswerte angegeben.

Tabelle 37: Emissionsfaktoren für CO<sub>2</sub> und CO bei der Aluminiumherstellung

	kg/Mg Aluminium	Unsicherheit in kg/Mg
Kohlendioxid	1.400	± 200
Kohlenmonoxid	150	± 50
Quelle: Harnisch (1995)		

Da das freigesetzte Kohlenmonoxid in der Atmosphäre zu Kohlendioxid oxidiert wird, ergibt sich bezogen auf Sauerstoff eine überstöchiometrische Freisetzung von Kohlendioxid. Statt dem vom UBA angegebenen Emissionsfaktor von 1,222 Mg CO<sub>2</sub>/ Mg Al ist aus diesen Gründen und nach den Daten von Harnisch ein Faktor von 1,5+0,275 d.h. 1,8 Mg CO<sub>2</sub>/ Mg Al anzusetzen. Dies entspricht einem Materialverbrauch von 490 kg Anode pro Mg Aluminium, der für vorgesinterte Anoden gelten kann. Bei Söderberg-Anoden wird ein höherer Wert von ca. 540 kg/Mg Al beobachtet (Qui Zhuxian 1995).

### A.2.2.2 Optionen

#### A.2.2.2.1 Produktvermeidung

Verglichen mit anderen Gebrauchsmetallen ist Aluminium ein vergleichsweise neuer Werkstoff. Vor allem wegen seines geringen spezifischen Gewichts und seiner chemischen Beständigkeit hat das Aluminium andere Werkstoffe verdrängt bzw. neue Anwendungen überhaupt erst möglich gemacht. Die Frage, ob aus ökologischen Gründen nicht eine teilweise Umkehr dieses Verdrängungsprozesses

sinnvoll ist, wird seit mehreren Jahren intensiv diskutiert. Vorrangig diskutierte Anwendungsbereiche sind dabei Automobilkarossen und der Hochbau. Hier werden entweder noch andere Materialien genutzt (Eisen, Holz, Kunststoffe) und es werden andere, neue Materialien bislang in Einzelfällen eingesetzt (glasfaserverstärkte Kunststoffe).

Bei Einsatz ökonomischer oder ordnungsrechtlicher Maßnahmen wäre es möglich, den Verdrängungsprozeß umzukehren, traditionellen Werkstoffen ihr Anwendungsgebiet zu erhalten oder wieder zu erschließen bzw. neuen Werkstoffentwicklungen die Einführungschancen zu verbessern.

#### **A.2.2.2.2 Verstärkter Einsatz von Recyclingmaterial**

Eine Verringerung der nichtenergiebedingten Kohlendioxidemissionen bei der Herstellung von primärem Aluminium wäre durch die Verstärkung der Wiedergewinnung von Aluminium möglich, das derzeit dem Wirtschaftskreislauf entzogen wird.

Hinsichtlich der Verwendung von Recyclingmaterial sind grundsätzlich zu unterscheiden:

1. Abfälle aus der Aluminiumherstellung
2. Abfälle aus der ersten Verarbeitungsstufe
3. Abfälle aus weiteren Verarbeitungsstufen
4. Post-Consumer-Abfälle
5. Abfälle aus Entsorgungsanlagen.

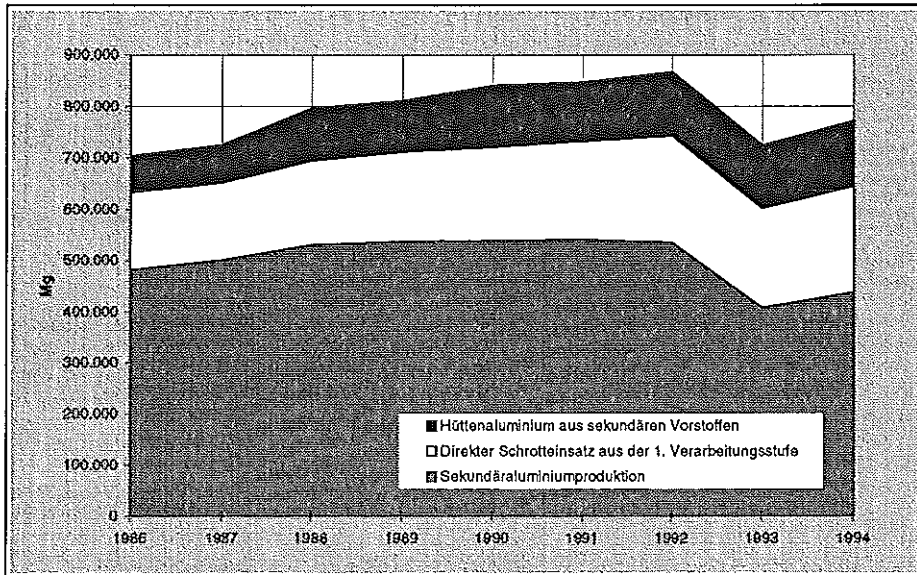
Je niedriger die Fertigungs- bzw. Verarbeitungsstufe um so größer sind i.d.R. die anfallenden Chargen, um so besser ist die Zusammensetzung bekannt und einheitlich, um so geringer sind die enthaltenen und anhaftenden Verunreinigungen. Abfälle aus der Primäraluminiumherstellung und ggf. der ersten Verarbeitungsstufe lassen sich deshalb i.d.R. zum Ersatz von Primäraluminium einsetzen. Aus aluminiumhaltigen Abfällen aus weiteren Fertigungsstufen, Post-Consumer-Abfällen und Abfällen aus Entsorgungsanlagen lassen sich nur noch bestimmte Aluminiumlegierungen fertigen. Zum Einschmelzen dieser Abfallarten werden überwiegend Kurzstrommelöfen mit Salzbadern eingesetzt, denen Schwelanlagen zur Entfernung organischer Bestandteile der aluminiumhaltigen Abfälle vorgeschaltet sein können.

Der Einsatz von Recyclingmaterial für die Produktion von Hütten- oder Sekundäraluminium hat in den letzten zehn Jahren relativ und absolut zugenommen (vgl. Abbildung).

Die Gewinnung von Hüttenaluminium aus sekundären Vorstoffen insgesamt hat sich in zehn Jahren fast verdoppelt (1984: 65.000 Mg, 1994: 127.100 Mg). Zusätzlich hat der direkte Schrotteinsatz aus der 1. Verarbeitungsstufe bei der Verarbeitung

des Hüttenaluminiums in zehn Jahren um über 40 % zugenommen (1984: 144.100 Mg, 1994: 206.200 Mg). Bei dem Erschmelzen von Sekundäraluminium in Umschmelzanlagen ist es 1992 zu einem Einbruch gekommen, der wahrscheinlich in Zusammenhang mit der Schließung von Anlagen steht. Die Produktion der Konkurrenten hat seitdem wieder zugenommen und erreichte 1994 fast den Stand von

Abbildung 10: Einsatz von Recyclingmaterial für die Herstellung von Aluminiumprodukten



1984 (1984: 442.200 Mg, 1994: 438.100 Mg). Die Rohstoffe der Sekundäraluminiumproduktion stammen zu ca. 50 % aus dem Ausland, wobei z.B. Rußland 1994 einen Anteil von 5 % des produzierten "Sekundäraluminiums" lieferte.

Hingegen lag der Gesamtanteil des Recyclingmaterials am Verbrauch 1984 bei 30 %, stieg 1991 auf 41 %, ist aber bis 1994 wieder auf 35 % zurückgegangen (Metallgesellschaft 1995).

Zur Rückgewinnung von Aluminium aus Post-Consumer-Abfällen und aus Abfällen aus Entsorgungsanlagen zur Herstellung von Aluminiumprodukten konnten im Rahmen dieser Studie keine belastbaren Daten ermittelt werden.

Nur bzgl. 19.100 Mg Aluminiumdeckel von Getränkedosen (ca. 16 % der im Verpackungsbereich 1993 eingesetzten Al-Masse) ist bekannt, daß sie mit dem Eisenblech der Dosen eingeschmolzen wurden, also keine neuen Aluminiumprodukte

daraus hergestellt wurden (Gudenau 1995). Es ist zu befürchten, daß ähnliches auf einen weit größeren Anteil der entsprechenden Aluminiumabfallarten zutrifft.

#### **A.2.2.2.3 Einsatz anderer Elektroden**

Die Entwicklung von interten Anoden, aber auch Kathoden, war Gegenstand umfangreicher Forschungsarbeiten in USA, Norwegen, der Volksrepublik China aber auch in Deutschland.

Basis für die Entwicklungsarbeit waren folgende Anforderungen, die inerte Anoden erfüllen sollten (nach Pawlek 1995):

1. Beständigkeit gegen die chemisch und elektrische Korrosion, insbesondere durch die extrem aggressive kyrolithhaltige Salzsämelze, die gelöstes Aluminium enthält.
2. Beständigkeit gegenüber dem nascierenden Sauerstoff.
3. Gute elektrische Leitfähigkeit und geringer Widerstand der Anschlüsse für die Stromzuführung.
4. Thermische Beständigkeit, Unempfindlichkeit gegen thermische Schocks und ausreichende Duktilität bis 1.000°C.
5. Niedrige Herstellungskosten und leicht verfügbar.
6. Leichte Herstellbarkeit in großen Dimensionen.
7. Hohe Überspannung für die Entladung von Oxiden und Fluoriden.
8. Gute elektronisch Leitfähigkeit.
9. Stabile elektrische Verbindung mit der Stromzuführung.
10. Ausreichende mechanische Eigenschaften.

Grundsätzlich können die Entwicklungen in mischkeramische Anoden und Anoden auf Basis von Zinndioxid unterschieden werden.

Mischkeramische Elektroden mit Anteilen von Kupfer, Nickeloxid und Eisen(III)oxid wurden von Alcoa entwickelt. Die Anoden werden über eine Mischung von pulverförmigen Ausgangsmaterialien hergestellt, die zur Anode gesintert werden. Die neue Anode ist Bestandteil einer neuen Ausführung der gesamten Elektrolysezelle für die Niedertemperaturelektrolyse.

Die C. Conradty GmbH & Co KG, Nürnberg, hat ein Patent auf eine Anode aus mischkeramischen Elementen, die zusammen mit leitenden Verbindungselementen zu einer Anode montiert werden.

Andere Entwicklungen auf der Basis von Mischkeramik stammen u.a. aus den Labors der Eltech Research Cooperation, des Massachusetts Institute of Technology und des Pacific Northwest Laboratory.

Ziel der Anodenentwicklung war neben Entwicklung inerte Anoden auch eine Reduktion des Energieverbrauchs bei der Elektrolyse. Durch die neuen Anoden sollte eine Reduktion des Energieverbrauchs um 30 % erreicht werden (Pawlek 1995).

Zum weitergehenden Schutz der mischkeramischen Anoden wurden Ceroxyfluorid-Beschichtungen entwickelt, die auf den Anoden aufgesintert wurden. In einer weiteren Entwicklung wurde dem Anodenmaterial selbst Cer- und Aluminiumoxide zugesetzt, so daß sich die Schutzschicht an der Anodenoberfläche ständig neu bildete.

Die Mischkeramik-Anoden wurden verschiedenen Tests unterzogen. Zumindest in einem Teil der Tests wurde eine "erhebliche" Korrosion der Anoden festgestellt. Optimierungsarbeiten an der Technik der Elektrolyse-Zellen und der Elektrolytzusammensetzung, sowie den Anoden selbst, schlossen sich an die Tests an. Quantitative Angaben zur Standfestigkeit der Anoden, die mit dem Verhalten der Kohle-Anoden in Relation gesetzt werden könnten, konnten im Rahmen dieser Studie nicht ausgewertet werden.

In Forschungseinrichtungen der Volksrepublik China wurden inerte Anoden auf der Basis von Zinndioxid entwickelt. Durch Zusatz verschiedener Oxide, u.a. Ceroxid, und Optimierung der Elektrolytzusammensetzung gelang es, die Korrosion auf  $0,01 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  zu begrenzen, was einer Verkürzung der Anoden um 12 cm pro Betriebsjahr entspräche (Pawlek 1995). In anderen Versuchen wurde ebenfalls an Anoden auf Zinnoxid-Basis bei einer Stromausbeute von 90 % eine Korrosion von  $0,0035 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  festgestellt. In weiteren Versuchen wurde eine Korrosion von 1,6 bis  $12,5 \text{ mg}/(\text{A} \cdot \text{h})$  festgestellt, wobei der niedrigste Wert einer Anodenverkürzung von ca. 2 cm/a entspräche (Pawlek 1996b).

Trotz dieser im Vergleich zum Verbrauch der Kohleanoden (bis 500 kg/Mg Al) gering erscheinenden Werte, werden die Probleme:

- Oxidation und Korrosion der Anoden
- Kontamination des hergestellten Metalls
- Standdauer der Anoden
- unzureichende elektrische Leitfähigkeit der Anoden
- Herstellungskosten der Anoden

weiterhin als so erheblich angesehen, daß ein Einsatz nicht für möglich gehalten wird (Pawlek 1996b).

#### A.2.2.2.4 Verbesserung der Kohleanoden

Durch die Entwicklung von Beschichtungen wurde versucht, den Verbrauch der Kohleanoden zu reduzieren (vgl. Naterstad 1986).

Durch die Optimierung der Zusammensetzung des Elektrolyten, insbesondere mit dem Ziel einer Reduktion der Betriebstemperatur, konnte bei Söderberg-Anoden

eine Reduktion des Materialverbrauchs erzielt werden, während dies bei vorgesinterten Anoden nicht erreicht werden konnte (Kazadi 1989).

#### **A.2.2.2.5 Andere Reduktionsverfahren**

Als Alternative zur elektrolytischen Reduktion von Aluminiumoxid in der Hall-Héroult-Zelle wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Hiervon sind die direkte Reduktion mit Kohlenstoff und die Elektrolyse von Aluminiumchlorid erwähnenswert.

##### **A.2.2.2.5.1 Reduktion des Aluminiumoxids mit Kohlenstoff**

Die Reduktion von Aluminiumoxid mit Kohlenstoff erfolgt in zwei Stufen in Öfen. In der ersten Stufe wird das Aluminiumoxid mit Koks bei 1930 bis 2030 °C zu Aluminiumcarbid umgesetzt. In der zweiten Stufe wird das Aluminiumcarbid bei 2030 bis 2130 °C gespalten, wobei Aluminium und Kohlenmonoxid entsteht. Die Ausbeute des Prozesses konnte bis auf 67 % gesteigert werden (Frank 1985).

##### **A.2.2.2.5.2 Elektrolyse von Aluminiumchlorid**

Alcoa entwickelte 1976 einen Aluminiumherstellungsprozess, der auf der Elektrolyse von Aluminiumchlorid basierte. Im ersten Schritt wird Aluminiumoxid, das mit Petrolkoks pyrolytisch beschichtet wurde, mit Chlor umgesetzt. Hierbei entsteht neben Kohlendioxid und Kohlenmonoxid Aluminiumchlorid. Aufgrund seiner Verdampfbarkeit, kann das erhaltene Aluminiumchlorid durch Destillation gereinigt werden. Im zweiten Schritt wird das gereinigte Aluminiumchlorid durch Elektrolyse in Aluminium und Chlor gespalten. Das erhaltene Chlor wird zur Reaktion mit dem Aluminiumoxid zurückgeführt (Frank 1985).

#### **A.2.2.3 Weiterer Untersuchungsbedarf**

Zur Vermeidbarkeit von Aluminiumprodukten liegen eine Reihe von Erkenntnissen vor. Solange kein politischer Wille vorhanden ist, diese vorhandenen Erkenntnisse auch anzuwenden, ergibt sich kein Bedarf diese Erkenntnisse zu erweitern.

Untersuchungsbedarf ergibt sich in Bezug auf die Hemmnisse, die den Einsatz von inerten Anoden (bzw. entsprechenden Elektrolysezellen) verhindern. Neben offenen technologischen Fragen ist hier auch zu klären, ob patentrechtliche Fragen, Verbindungen zwischen Anodenherstellern und Aluminiumherstellern dafür verantwortlich sein könnten, daß entsprechende Umstellungen nicht erfolgen.



## A.2.3 Ammoniakherstellung

### A.2.3.1 Emissionsursachen

Für die Betrachtung der Emissionsursachen und eine mögliche Erstellung von Daten für Prozessketten bedarf es einer genaueren Analyse der Emissionsursachen und der zugehörigen Daten.

Ursache der  $\text{CO}_2$ -Emission bei der Herstellung von Ammoniak ist die Darstellung von Wasserstoff. Elementarer Wasserstoff kommt auf der Erde i.d.R. nicht in nutzbaren Konzentrationen vor. Ausnahmen sind vulkanische Gase und bestimmte Erdgase, die einen Anteil bis 40 Vol. % Wasserstoff aufweisen können (Häussinger 1989). Wasserstoff muß daher aus anderen Stoffen durch chemische Reaktionen hergestellt werden. Hierfür geeignete Stoffe müssen einen möglichst hohen Anteil an Wasserstoffatomen aufweisen und dieser sollte in einer chemischen Reaktion, die eine möglichst geringe Energiezufuhr benötigt, freigesetzt werden.

Die genannten Anforderungen werden von der Reaktion von Kohlenwasserstoffen mit Wasser und Sauerstoff erfüllt. Als Kohlenwasserstoff können Kohle, Mineralöle oder Erdgas eingesetzt werden, wobei der molekulare Anteil an nutzbarem Wasserstoff in dieser Reihenfolge zunimmt.

Tabelle 38: Eignung verschiedener Rohstoffe zur Wasserstoffherstellung

	Wasser $\text{H}_2\text{O}$	Kohle $\text{CH}_{0,7}$	Schweröl $\text{CH}_{1,4}$	Naphtha $\text{CH}_{2,2}$	Flüssiggas $\text{CH}_{2,6}$	Erdgas $\text{CH}_4$
Energie durch Oxidation des Kohlenstoffs zu $\text{CO}_2$ kJ/kg	-	38.100	41.300	44.300	46.130	5-50
Nebenprodukte	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$ /S	$\text{CO}_2$ /S	$\text{CO}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}_2$
Menge der Nebenprodukte relativ zum Wasserstoff	0,5	0,43 / 0,002 - 0,01	0,37 / 0,003 - 0,015	0,32	0,30	0,25
theoretischer Energiebedarf in kJ pro hergestelltem kmol Wasserstoff	242.000	57.150	50.300	38.350	37.500	41.280
Quelle: Häussinger (1989)						

Die Übersicht macht deutlich, daß aus chemischen Gründen leichte Kohlenwasserstoffe bevorzugte Rohstoffe zur Herstellung von Wasserstoff sind. Allerdings relativieren die praktisch erzielbaren Ausbeuten die Unterschiede etwas. Aus diesem Grund, aus ökonomischen Gründen, aufgrund der Verfügbarkeit und wegen des unterschiedlichen Aufwandes bei der Reinigung des erzeugten Rohgases sind grundsätzlich alle Rohstoffe für die Wasserstoffherstellung dennoch von Bedeutung.

Wichtige Prozesse für die Herstellung von Wasserstoff sind daher (Häussinger 1989):

- a) Wasserstoffabscheidung aus Kokereigas
- b) Kohlevergasung
- c) Partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen
- d) Katalytisches Reformieren von Gasen
- e) Thermisches Cracken von Kohlenwasserstoffen
- f) Katalytische Cracken von Kohlenwasserstoffen
- g) Katalytisches Reformieren von Mineralölen
- h) Steam Cracken.

Die vier letztgenannten Verfahren werden bei der Verarbeitung von Mineralölen in Raffinerien eingesetzt.

*zu a) Wasserstoffabscheidung aus Kokereigas*

Pro Tonne Kohle wird in den Kokereien ca. 350 m<sup>3</sup> Gas gebildet. Von diesem werden 30 bis 45 % zur Feuerung intern verbraucht. Das Kokereigas enthält ca. 57 % Wasserstoff, vom dem ca. 80 % durch Swing-Adsorption gewonnen werden können. Das verbleibende Gas besteht überwiegend aus Methan und kann deshalb als schwaches Heizgas eingesetzt werden.

*zu c) Partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen*

Die partielle Oxidation wird vor allem mit schweren Kohlenwasserstoffen durchgeführt. Aus 1 Mg Vakuumrückstand lassen sich durch dieses Verfahren ca. 2.600 m<sup>3</sup> Wasserstoff gewinnen. Bei Einsatz zur Ammoniakherstellung entspricht dies ca. 1,28 t Ammoniak.

*zu d) Katalytisches Reformieren von Gasen*

Das katalytische Reformieren wird vor allem mit leichten Kohlenwasserstoffen durchgeführt. Bei Einsatz von Erdgas werden pro m<sup>3</sup> Wasserstoff 0,432 m<sup>3</sup> Erdgas (95 % Methan) benötigt.

*zu e) Thermisches Cracken*

Ein thermisches Cracken wird mit schweren Destillationsrückständen durchgeführt. Das dabei entstandene Gas enthält, wie das Kokereigas, Wasserstoff. Soweit das Gas nicht vollständig zu Heizzwecken eingesetzt wird, kann daraus Wasserstoff durch Swing-Adsorption gewonnen werden.

*zu f) Katalytisches Cracken*

Auch beim katalytischen Cracken kommt es zur Bildung von Koks unter Abgabe von Wasserstoff aus hochmolekularen Kohlenwasserstoffen. Je "schwerer" also das eingesetzte Öl ist, um so mehr Wasserstoff kann gewonnen werden. Ca. 0,5 gew. % bezogen auf das eingesetzte Öl können nach diesem Verfahren als Wasserstoff erhalten werden.

*zu g) Katalytische Reformieren von Mineralölen*

Beim Katalytischen Reformieren werden an Platinkatalysatoren aliphatische Kohlenwasserstoff in aromatische Kohlenwasserstoffe umgewandelt. Ca. 2-3 % des eingesetzten Öls (Naphtha) werden als Wasserstoff frei.

### Zu h) Steam Cracken

Steam Cracken von Ölen wird zur Herstellung von Ethylen durchgeführt. Das entstehende Rohgas enthält bei Einsatz von Naphtha ca. 16 mol % Wasserstoff. Das Rohgas enthält ansonsten je ca. 32 mol % Methan und Ethen, sowie 11 mol % Propen.

Aus den obenstehenden Daten lassen sich die folgenden Emissionsfaktoren für Kohlendioxid berechnen.

Tabelle 39: Freisetzung von CO<sub>2</sub> bei der Herstellung von Wasserstoff

Wasserstoffgewinnung durch	g CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> /Mg
Abscheiden aus Kokereigas	24.579	273.438
partielle Oxidation von Schweröl	1.263	14.051
partielle Oxidation von Naphtha <sup>1</sup>	1.192	13.260
katalytisches Reformieren von Erdgas	852	9.473
katalytisches Cracken von Schweröl	59.040	656.800
katalytisches Reformieren von Naphtha	11.143	123.960
Steam-Cracken von Naphtha	17.672	196.593
Anmerkung: 1. Wert für Naphta mit Reaktionsausbeute von Schweröl errechnet		

Es ist nicht verwunderlich, dass die partielle Oxidation von Schweröl (Naphtha) und das katalytische Reformieren von Erdgas die niedrigsten Wert im Vergleich zu anderen Verfahren aufweisen, da nur diese beiden Verfahren gezielt zur Wasserstoffherstellung konzipiert sind. Bei den anderen Verfahren wären für eine vergleichende Bewertung noch Gutschriften für die Erzeugung anderer Produkte von den obenstehenden Werten abzuziehen. Abzüge für den Einsatz anderer als der genannten Energieträger oder Gutschriften für abgegebenen Prozessdampf sind bei den obenstehenden Daten ebenfalls noch nicht berücksichtigt.

## A.2.3.2 Optionen

### A.2.3.2.1 Produktvermeidung

Ammoniak wird überwiegend zur Herstellung von stickstoffhaltigen Kunstdüngern eingesetzt. Von der Verwendung von Kunstdüngern ist bekannt, daß neben der hier diskutierten Kohlendioxidfreisetzung bei der Herstellung auch bei der Anwendung schädliche Effekte, wie z.B. eine Verunreinigung von Wasser und Boden mit Ammonium oder Nitrat eintreten kann. Gleichzeitig ist festzustellen, daß die Beseitigung von Gülle und Mist aus der industriellen Tierhaltung erhebliche Probleme bereitet, obwohl die entsprechenden Abfälle als Stickstoffdünger eingesetzt werden können. Ein Ausgleich dieses Mißverhältnisse zwischen Beseitigung natürlichen Düngers und Herstellung von künstlichen Düngemitteln könnte neben der Entlastung von Böden und Gewässern eine Verringerung der Kohlendioxidemissionen beider Ammoniakherstellung bewirken.

### **A.2.3.2.2 Alternative technische Herstellungsverfahren**

#### **A.2.3.2.2.1 Vorbemerkung**

Schon vor Jahrzehnten wurde die Zielvorstellung entwickelt, fossile Brennstoffe durch Wasserstoff zu ersetzen. Dementsprechend wurden zahlreiche Ansätze entwickelt, Wasserstoff auf anderer Basis, als durch den Einsatz von Kohlenwasserstoffen, herzustellen.

Da eine Aufarbeitung und Bewertung der technischen Entwicklungen im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich ist, sollen hier nur die wichtigsten Ansätze aufgezeigt werden.

#### **A.2.3.2.2.2 Biologische Herstellung**

Verschiedene Bakterien und Algen sind in der Lage, durch Sonneneinstrahlung über ihre Enzyme Wasserstoff und Sauerstoff freizusetzen. Je nach Bakterien- und Algenart müssen hierfür bestimmte Nährstoffe zur Verfügung stehen bzw. nicht zur Verfügung stehen. Der Vorgang kann sowohl mit den lebenden Zellen, als auch außerhalb der Zellen durchgeführt werden. Je Gramm Trockenmasse werden 5 bis 500 ml Wasserstoff pro Stunde gebildet.

#### **A.2.3.2.2.3 Photochemische Herstellung**

Bestimmte Metallsalze werden in wässriger Lösung durch elektromagnetische Strahlung zur Redox-Reaktionen angeregt, bei denen Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt wird. Technisch wird der Prozeß mit Farbstofflösungen und Katalysatoren auf Trägern durchgeführt. Hierdurch kann eine Quantenausbeute von 2 % erreicht werden und 400 ml Wasserstoff pro Stunde und Liter Substrat erhalten werden. Probleme entstehen allerdings durch Nebenreaktionen, die zum Verbrauch der Farbstoffe führen können.

#### **A.2.3.2.3 Elektrochemische Herstellung**

Die Elektrolyse von Wasser zur Herstellung von Wasserstoff wird seit 1927 industriell betrieben.

Als Elektrolyt wird i.d.R. eine wässrige Lösung mit 25 bis 36 gew % Kaliumhydroxid eingesetzt. Aber auch Ausführungen mit Salzsäure sind im Einsatz, wenn diese als Abfall anfällt. Neben der Säure- oder Laugezugabe wird die Temperatur des Elektrolyten durch Zuführung von thermischer Energie erhöht, um die Leitfähigkeit zu verbessern. Zur Ausführung der Zellen, der Diaphragmen und Elektroden

wurden ebenso wie zu den Betriebsbedingungen zahlreiche Modifikationen entwickelt.

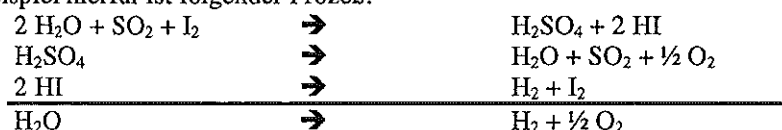
Vorteil des Verfahrens sind die vergleichsweise geringen Investitionskosten für die entsprechenden Anlagen. Nachteile sind der Bedarf an elektrischer Energie, der eine Realisation nur an Standorten mit preiswerter elektrischer Energie zuläßt, und die vergleichsweise geringen Anlagengrößen. Pro m<sup>3</sup> Wasserstoff werden 4,2 bis 4,6 kWh elektrische Energie benötigt (15.000 bis 16.500 kJ/m<sup>3</sup>) (Daum 1993). Zur Bewertung ist davon eine Gutschrift für den gleichzeitig erzeugten Sauerstoff oder das gleichzeitig erzeugte Chlor abzuziehen.

Eine maßgebliche Bedeutung hat die Elektrolyse bislang jedoch nur dann erlangt, wenn der Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt, d.h. die Erzeugung von Chlor und Natronlauge den eigentlichen Zweck der Anlage darstellt.

#### A.2.3.2.4 Thermochemische Herstellung

Die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser ist exotherm. Sie kann jedoch umgekehrt werden, wozu es neben der Zuführung von thermischer Energie hoher Temperaturen bedarf (> 2.500 K). Durch den Einsatz verschiedener chemischer Redoxreaktionen kann jedoch die erforderliche Temperatur deutlich vermindert werden.

Ein Beispiel hierfür ist folgender Prozeß:



Für den jeweiligen Hochtemperaturschritt der Prozesse wird eine Temperatur von 50 bis 850 °C benötigt. Als erreichbare Effizienz dieser Verfahren wird ein Bereich von 50 bis 80 % angesehen (Häussinger 1989).

#### A.2.3.3 Weiterer Untersuchungsbedarf

Bezüglich der nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Herstellung von Ammoniak handelt es sich genau genommen nur um einen Teil der Emissionen, die mit der Herstellung von Wasserstoff insgesamt verbunden sind. Für eine Betrachtung von Reduktionsmaßnahmen wäre daher erforderlich, erst einmal eine Bilanz zu erstellen, die alle Bereiche der Herstellung und Verwendung von Wasserstoff erfaßt. Darüber hinaus wären jeweils die Anknüpfungspunkte zu den energetisch bedingten Emissionen zu überprüfen, da bei den entsprechenden Verfahren die maßgeblichen Einsatzstoffe gleichzeitig als Rohstoff und Energieträger dienen.

Die Herstellung von Wasserstoff auf der Basis von nicht fossilen Rohstoffen zur Verwendung als Energieträger ist Gegenstand umfangreicher Forschungspro-

gramme gewesen. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte jedoch nicht ermittelt werden, welche Hemmnisse einer Verwendung dieser teuer entwickelten Techniken in den Bereichen, in denen heute tatsächlich Wasserstoff eingesetzt wird, entgegenstehen. Hier wäre eine Analyse der Hemmnisse durchzuführen und danach ggf. eine Neukonzeption der bisherigen Entwicklungspolitik vorzunehmen, damit die kostspielig entwickelten Techniken mittelfristig eingesetzt werden können.

## **A.2.4 Glas**

### **A.2.4.1 Emissionsursachen**

#### **A.2.4.1.1 Vorbemerkung**

Der Begriff "Glas" bezeichnet nicht einen chemischen Stoff, sondern eine ohne Kristallisation erstarrte Schmelze. Aus diesem Grunde kann "Glas" von äußerst unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung hergestellt werden. Im Rahmen dieser Studie sollen nur Quarzglas und silikatische Gläser betrachtet werden.

#### **A.2.4.1.2 Quarzglas**

Bedeutendstes Ein-Komponenten-Silikatglas ist das Quarzglas. Quarzglas kann durch das Schmelzen von Siliciumdioxid oder die Zersetzung von Siliciumtetrachlorid hergestellt werden. Soweit im Rahmen dieser Studie feststellbar treten hierbei keine nichtenergiebedingten Kohlendioxidemissionen auf.

#### **A.2.4.1.3 Silikatische Gläser**

Ein weites Anwendungsfeld haben Gläser, die vorwiegend aus dem Schmelzen von Siliciumdioxid mit Alkali- und oder Erdalkalioxiden gewonnen werden. Zur Färbung oder zur Absorption von kurzwelliger Strahlung werden weitere Oxide zugesetzt.

Eine nichtenergiebedingten Freisetzung von Kohlendioxid ergibt sich bei der Herstellung durch die (chemisch) vorgelagerte, thermische Zersetzung von Alkali- und Erdalkalicarbonaten zu den entsprechenden Oxiden.

Für die wichtigsten Gebrauchsgläser können folgende mittlere Zusammensetzungen angenommen werden.

Tabelle 40: Zusammensetzung von Gläsern in Gew.-%

Verwendungszweck	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	PbO	Sonstige
Fensterglas	72	0,3			9		4	14		
Flaschenglas	73	1,5			10	0,6	0,1	14		
Lampenröhren	56	2				9		4	29	
Glühlampenglas	73	1			5		4	17		
Wirtschaftsglas	75	1,5			8	0,5		14,5		
Isolierfaserglas	54	14	10		17,5		4,5			
Bildröhrenkolbenglas I	67	4		13		8		8		
Bildröhrenkolbenglas II	54	2			3	8	2	6	23	
Bildschirmglas	65	2		2	2	9	1	7	2	Sr-, Ti-, Ce-, As-, Sb-Oxide

Quellen: Falbe (1990), Bernard (1989)

Die Zusammensetzung ist vom Verwendungszweck abhängig und muß je nach den geforderten Produkteigenschaften mehr oder weniger eng eingehalten werden.

Die Emissionen durch den Einsatz der Carbonate können durch den Einsatz von Recyclingmaterial bei der Glasherstellung vermindert werden. Hiervon zu unterscheiden ist jedoch der Einsatz von Scherben. Im jeweiligen Fertigungsprozeß wird ein unterschiedlicher Anteil von Scherben eingesetzt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht zwangsläufig um Recyclingmaterial. Bei der Herstellung von Flachglas entstammen die Scherben bislang fast ausschließlich der jeweiligen Herstellungsanlage selbst. Lediglich bei der Herstellung von Behälterglas werden überwiegend Scherben eingesetzt, die aus der Sammlung von Verbraucherabfällen aufbereitet wurden. Bei der Herstellung von Gläsern bzw. Glasmaterialien für den Baubereich bzw. technischen Anwendungen ist der Anteil der Scherben aus dem "post-consumer"-Recycling je nach Anwendungsbereich sehr unterschiedlich.

1993 wurden in der BRD 3,8 Mio. Mg Behälterglas hergestellt und 2,4 Mio. Mg Altglas (altes Behälterglas) gesammelt. Die Möglichkeiten des Einsatzes des gesammelten Altglases werden durch unterschiedliche Farben und Zusammensetzungen des Behälterglases, sowie die Beimengungen an anorganischen und organischen Fremdstoffen begrenzt. Nicht alles gesammelte und aufbereitete Alt-(Behälter)-Glas wird deshalb zur Herstellung von Behälterglas eingesetzt. Ein Teil wird, z.B. der Herstellung von Bauprodukten und technischen Produkten zugeführt.

#### A.2.4.2 Optionen

Zur Reduktion der nichtenergiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Glas sind grundsätzlich folgende Optionen denkbar:

1. Verminderung des Verbrauchs an Behälterglas,
2. Verbesserung der Recyclings von Behälterglas,
3. Einführung des Flachglasrecyclings,
4. Veränderungen bei der Rezeptur der gebräuchlichsten Glassorten.

#### **A.2.4.2.1 Verminderung des Verbrauchs an Behälterglas**

Eine Verminderung des Verbrauchs an Behälterglas ist wiederum durch verschiedene Ansätze möglich.

Durch die Reduktion der Herstellung und des Verkaufs von Glas-Einweggebinden kann die Produktion vermindert werden. Hierbei ist nicht nur an die Erhöhung der Quoten von Mehrwegbehältnissen in Bereichen, in den Einweg- und Mehrwegbehältnisse konkurrieren, zu denken, sondern auch an die Einführung von Mehrwegbehältnissen in neuen Bereichen, z.B. bei Konserven, Spirituosen etc.

Durch die Reduktion der relativen Masse der Behältnisse kann nicht nur CO<sub>2</sub> bei der Glasherstellung eingespart werden, sondern vor allem Transportenergie. Ansätze hierzu sind die Entwicklung von Leichtglasflaschen, Kunststoff-Glas-Verbundgebinden etc.

Schließlich ist auch ein Ersatz von Glas durch andere Materialien, vor allem durch Kunststoffe, denkbar. Polycarbonatflaschen oder Folienschläuche statt Glasflaschen können hier eine Alternative sein.

#### **A.2.4.2.2 Verbesserung der Recyclings von Behälterglas**

Während die Anteile des Recyclings bei grünem Behälterglas aus technischen Gründen schon sehr hoch sind und wahrscheinlich nur noch wenig optimiert werden können, sind die Recyclinganteile bei weißem Behälterglas noch vergleichsweise niedrig.

Zur Verbesserung des Recyclings, in Form einer tatsächlichen Wiederverwendung, besteht zum einen die Möglichkeit, Behälter, die bisher aus weißem Glas waren, durch grünes Glas zu ersetzen.

Die andere Möglichkeit ist eine Verbesserung der Recyclingtechnik. Hierfür müssen integrierte Ansätze entwickelt werden, in denen die erforderlichen Maßnahmen in jeder Stufe von der Produktkonzeption bis zum Wiedereinschmelzen aufeinander abgestimmt werden. So muß z.B. auf überflüssige Etiketten, schwer abtrennbare Verschlüsse genauso verzichtet werden, wie etwa die Gestaltung von Sammelstationen optimiert werden. Schließlich muß auch die biologische und physikalische Scherben-Aufarbeitungstechnik weiter optimiert werden.

#### **A.2.4.2.3 Einführung des Flachglasrecyclings**

Das Recycling von Flachglas steckt im Vergleich zum Recycling von Behälterglas noch in den Kinderschuhen (Dopfer 1996). Ca. 15 % des in Deutschland hergestell-



ten Flachglases werden im Fahrzeugbau eingesetzt und ca. 85 % im Baubereich. Vor allem wegen der Im- und Exportströme bei KFZ-Glas und KFZ kann das Verhältnis bei Anfall von entsprechendem gebrauchten Glas hiervon abweichen.

Bei dem Recycling von Bauglas bestehen derzeit die größeren Probleme im Bereich der Sammlung. Während bei der Bauphase und bei Gebäudesanierung die Erfassung von Bauglas noch vergleichsweise einfach ist, bestehen die größten Probleme beim Gebäudeabbruch. Der Anteil der Masse des Bauglases an der Gesamtmasse der Gebäude ist i.d.R. so gering, daß ein getrennter Ausbau der Fenster und eine Erfassung des Glases extrem unwirtschaftlich ist. Hier müssen neue Ansätze entwickelt werden bzw. Ansätze zu Ausbaupflichten bzgl. des Rahmenmaterials gezielt um eine Erfassung des Glasanteils ergänzt werden. Daneben sind Probleme bei der Analyse und dem nachfolgenden Einschmelzen des Glases zu lösen.

Einfacher gestaltet sich die Erfassung des Glases aus dem KFZ-Bereich. Sofern hier bestehende Überlegungen zum KFZ-Recycling mit vorgeschalteter Teildemontage durchsetzen, kann dabei auch das Glas erfaßt werden. Schwierigkeiten kann hier aber die Vielfalt der eingesetzten Gläser und Verbundgläser herbeiführen, wenn das Glas wieder zu KFZ-Glas eingeschmolzen werden soll. Auch hier müßten geeignete Sortiertechniken weiter entwickelt werden.

#### **A.2.4.2.4 Veränderungen bei der Rezeptur der gebräuchlichsten Glassorten**

Schließlich ist zu prüfen, ob die Rezepturen der gebräuchlichsten Glassorten nicht auch eine gewisse Optimierung in Bezug auf den Einsatz von Rohstoffen, die zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung beitragen, erlaubt. Immerhin sind in den vorliegenden Datenquelle gewisse Spannbreiten für die Zusammensetzungen verzeichnet, die vermuten lassen, daß bei vielen Gebrauchsgläsern Rezepturänderungen zu noch tolerablen Änderungen der Glaseigenschaften führen. Zur CO<sub>2</sub>-Minderung würde z.B. eine Erhöhung des Aluminiumoxid- und Calciumoxidanteils und eine Reduktion des Natrium- und Kaliumoxidanteils beitragen.

#### **A.2.4.3 Weiterer Untersuchungsbedarf**

Für den Bereich des Recyclings von Flachglas bedarf es der Entwicklung von Systemen zur Erfassung und wiederverwendungsgerechten Aufbereitung.

Im Bereich des Recyclings von Behälterglas bedarf es der Verbesserung der Sammlung von weißem Behälterglas. Die bestehende Aufarbeitungstechnologie muß weiter optimiert werden, damit auch bei stärkeren Verunreinigungen ein hochwertiges Aufbereitungsergebnis erzielt werden kann, daß eine Ausweitung der Wiederverwertung zuläßt.



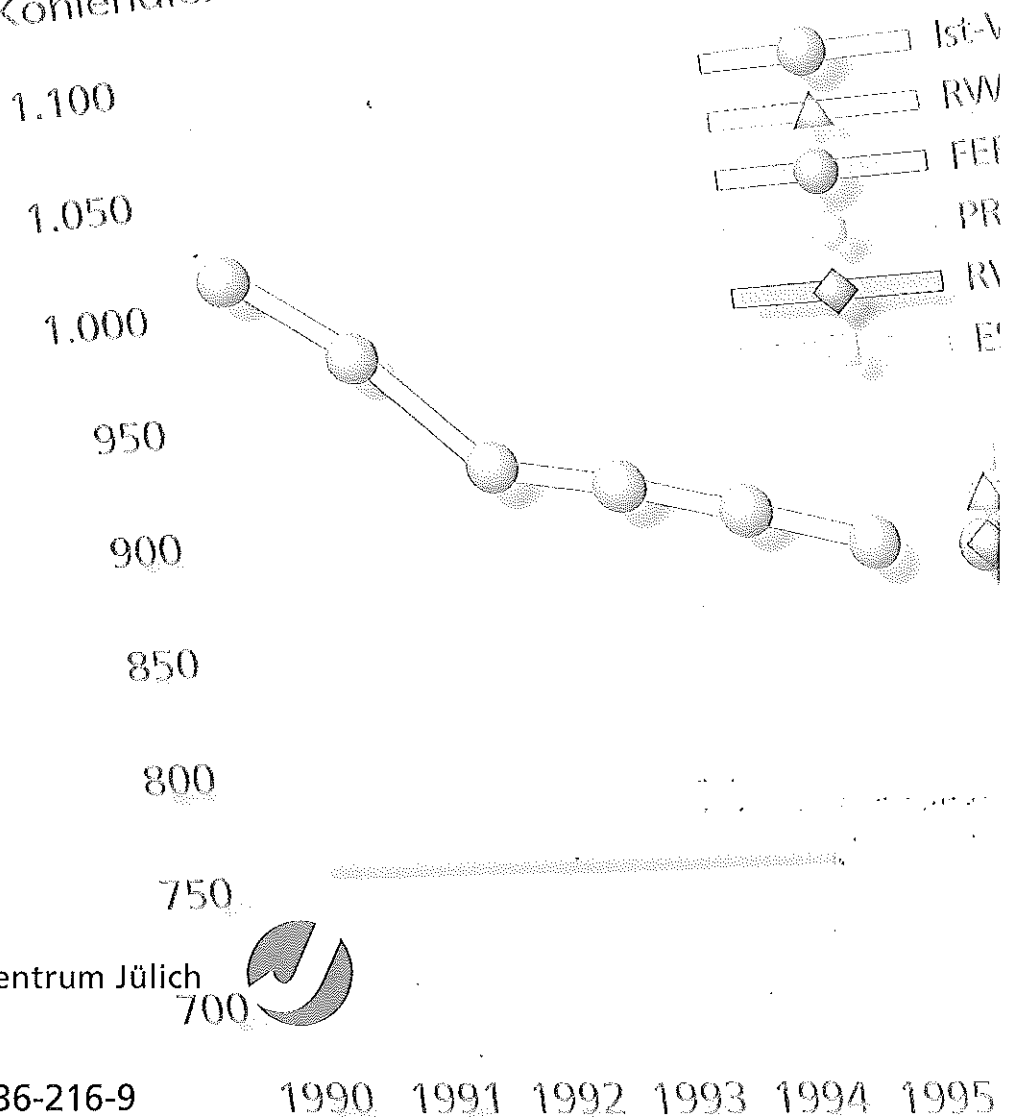
1. **Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland. Stand der Entwicklung**  
IKARUS-Workshop vom 24. bis 25. Januar 1996  
herausgegeben von S. Molt, U. Fahl (1997), 292 Seiten  
ISBN 3-89336-205-3
2. **Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft**  
Ein Beitrag zum Klimaschutz  
Workshop am 19. Februar 1997, veranstaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. Schultze  
ISBN 3-89336-206-1
3. **Modellinstrumente für CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien**  
IKARUS-Workshop vom 14. bis 15. April 1997  
herausgegeben von J.-Fr. Hake, P. Markewitz (1997), 284 Seiten  
ISBN 3-89336-207-X
4. **IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken**  
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien  
Abschlußbericht Teilprojekt 2 „Datenbank“  
H.-J. Laue, K.-H. Weber, J. W. Tepel (1997), 90 Seiten  
ISBN 3-89336-214-2
5. **Politikszenerarien für den Klimaschutz**  
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes  
**Band 1. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005**  
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 410 Seiten  
ISBN 3-89336-215-0
6. **Politikszenerarien für den Klimaschutz**  
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes  
**Band 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO<sub>2</sub>**  
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 110 Seiten  
ISBN 3-89336-216-9





# Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie nach ausgewählten

Kohlendioxidemissionen in Mill. t



Forschungszentrum Jülich



ISBN 3-89 336-216-9

1990 1991 1992 1993 1994 1995